

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Rakennustekniikan laitos

YADOLLAH SALIMI

**KAIVOSTEOLLISUUDEN TERÄSBETONISEN TORNIMAISEN REAKTORIN
RAKENTEELLINEN OPTIMOINTI**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 22.4.2013.**

Työn valvoja: Professori Jari Puttonen
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Jukka Piironen

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Rakennus- ja ympäristötekniikan kirjasto

TIIVISTELMÄ

Aalto-yliopisto Insinööritieteiden korkeakoulu Rakennustekniikan laitos		Diplomityön tiivistelmä	
Tekijä:	Yadollah Salimi		
Diplomityö:	Kaivosteollisuuden teräsbetonisen tornimaisen reaktorin rakenteellinen optimointi		
Päivämäärä:	22.4.2013	Sivumäärä	137 + 40
Professuuri:	Talonrakennustekniikka	Koodi:	Rak-43
Valvoja:	Professori Jari Puttonen		
Ohjaaja:	DI Jukka Piironen		
Avainsanat:	Betoni, lämpökuorma, hydrostaattinen paine		

Tarkastellun tornimaisen reaktorin käyttötarkoituksena on köyhien malmien hyödyntäminen hydrometallurgisella prosessilla. Reaktorin kokonaiskorkeus on 70 metriä ja se koostuu kolmesta osasta: alasäiliö, varsi ja yläsäiliö. Työn pää tavoitteena oli alasäiliön muodon määrittäminen ja sen rakenneratkaisun optimointi lämpökuorman ja hydrostaattisen paineen suhteen. Tavoitteena oli lisäksi tutkia vapaasti ja jäykästi tuettua pyörähdysymmetristä vartta sekä alasäiliön ja varren liitosta. Haasteellisimmat rasitukset olivat hydrostaattinen paine ja alasäiliön lämpöjännitykset.

Kirjallisuuskatsauksessa esitellään pyörähdyskuorten mitoitus. Varren rakenneratkaisut optimoitiin ja vartta tutkittiin teräsbetonisena ja esijännitettyinä rakenteena. Alasäiliön muoto määriteltiin ja sen rakenneratkaisut optimoitiin. Alasäiliö jaettiin kahteen osaan: ala- ja yläosa. Yläosaan sovellettiin pyörähdysymmetristä esijännitystä. Alasäiliön ja varren liitos vahvennettiin laatikollisin betonikerroksin hydrostaattista painetta vastaan. Se myös tutkittiin liittorakenteena ja teräsrakenteisena. Kaikki analyysit tehtiin Abaqus-laskentaohjelmalla.

Lämmönsiirron laskennan perusteella varren sisäpuolisen mineraalivillan paksuuden on oltava vähintään 100 mm, jotta betonin pitkäaikainen lämpötila pysyy suositellussa lämpötilassa ($\leq +65\text{ }^{\circ}\text{C}$) kesäolosuhteissa. Jäykästi kiinnitetyssä varressa betonikerroksen lämpötila $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aiheuttaa suuria vetojännityksiä juureen ja sen läheisyyteen.

Alasäiliön lämpöjännityksiä voidaan pienentää erilaisilla sisäpinnan lämmöneristeratkaisuilla eri osissa. Tutkimuksen tulosten perusteella alasäiliön rakenteen optimaalinen rakenneratkaisu on alaosassa: 50 mm lujitemuovi, 25 mm mineraalivilla, 125 mm polyuretaani, jännitetty teräsbetoni ja 100 mm polyuretaani sekä yläosassa: 50 mm lujitemuovi, 150 mm mineraalivilla, 700 mm jännitetty teräsbetoni ja 100 mm polyuretaani. Rakenteen sisä- ja ulkopuolinen lämmöneristekerros on tarpeen pitämään betonikerroksen lämpötila suositelluissa rajoissa. Rakenteeseen sijoitetuilla jännekaapeilla voidaan kumota yläosan betonipoikkileikkaukseen syntyvät vetojännitykset.

Hydrostaattinen paine on määräävä kuorma alasäiliön ja varren liitoksessa eikä siitä aiheutuvia vetojännityksiä voida pienentää tehokkaasti tutkituilla betonivahvennuksilla. Liittorakenteena vain pientä osaa teräksen myötölujuudesta voidaan käyttää hyväksi ja teräsrakenteena seinämän paksuuden on oltava vähintään 150 mm.

Vartta ja alasäiliötä on tutkittava tarkemmin liitoksen läheisyydessä. Jatkotutkimuksissa on tarkennettava toiminnallisen alasäiliön ja varren välisen liitoksen suunnittelua ja lämpötilajakauman mrittämistä. Myös rakenteiden eri materiaalikerrosten yhteistoimintaa, reaktoritornin rakennettavuutta ja jännittämistapaa on selvitettävä.

ABSTRACT

Aalto University School of Engineering Department of Civil and Structural Engineering		Abstract of the master's thesis	
Author:	Yadollah Salimi		
Thesis:	Structural optimization of tower-like reactor of reinforced concrete in mining industry		
Date:	22.4.2013	No. of pages	137 + 40
Professorship:	Structural Engineering and Building Physics	Code:	Rak-43
Supervisor:	Professori Jari Puttonen		
Instructor:	Jukka Piironen M.Sc.		
Key Words::	Concrete, temperature load, hydrostatic pressure		

The aim of the studied tower-like reactor is to utilize poor ores by improving hydrometal-
lurgical processes. The reactor is about 70 meters high and it consists of three parts; lower tank,
shaft and upper tank. The main aim of this thesis is to optimize the structures of the lower tank
under hydrostatic and temperature loads. Also the axisymmetric shaft of the reactor with free
and fixed bottom and the joint between the shaft and lower tank are studied. The greatest load
challenge is hydrostatic pressure and temperature load in the lower tank.

The literature part is a review over the calculations on axisymmetric shells. The structur-
al optimization of the shaft is defined and also studied as a reinforced and a pre-stressed
structure. The shape of the lower tank is defined as well as its structural optimization is carried
out. The lower tank is divided into two parts: lower part and upper part. An axisymmetric
pre-stressed method is applied on upper part. The joint is strengthened with a box-shaped
concrete structure against hydrostatic pressure. The joint is also studied both as composite and
steel structure. The analysis was carried out with Abaqus software.

According to heat transfer calculations the internal mineral wool in the shaft should be
at least 100 mm thick in order to keep the temperature of the concrete layer within the accep-
table range ($\leq +65\text{ }^{\circ}\text{C}$). The concrete layer of the shaft with a fixed bottom will be exposed to
high tensions if the temperature of the structure is $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tensions caused by temperature load could be reduced with different structural solutions
in both parts of the lower tank. Based on the study the optimized structure in the lower part is:
50 mm reinforced plastic, 25 mm mineral wool, 125 mm polyurethane, concrete layer and 100
mm polyurethane and in the upper part: 50 mm reinforced plastic, 150 mm mineral wool, 700
mm pre-stressed concrete layer and 100 mm polyurethane. The internal and external insulations
are necessary to keep the temperature of the concrete layer within the acceptable range. The
tension in the upper part may be nullified by the applied pre-stressing method.

Hydrostatic pressure is the largest load loading the joint and the stresses caused by it
cannot be reduced efficiently with strengthening. Only a small portion of the steel could be
utilized if the joint is designed as a composite structure of steel and concrete. If the load in the
joint area are carried out by a steel structure its thickness should be at least 150 mm.

However, in future a more exact study should be made for the joint area and for the di-
stribution of temperatures around structural discontinuities. Also the interaction between the
material layers of the structures, constructability and implementation of pre-stressing should be
paid attention to.

Sisältö

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	2
ESIPUHE	7
LYHENTEET JA MERKINNÄT	8
1 JOHDANTO	11
1.1 Tutkimuksen tausta	11
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	12
1.3 Tutkimuksen rajaus	12
1.4 Tutkimuksen sisältö	13
2 AIEMMAT TUTKIMUKSET	14
3 KUORI RAKENTEENA	15
3.1 Pyörähdyskuoren kalvotila	16
3.1.1 Pyörähdyskuoren kalvotila pyörähdyssymmetrisessä kuormi- tuksessa	18
3.1.1.1 Kalvovoimat	18
3.1.1.2 Venymät ja siirtymät	19
3.1.1.3 Kartiokuori ja lieriö pyörähdyssymmetrisessä kuor- mituksessa	20
3.2 Pyörähdyskuoren taivutustila	21
3.2.1 Voimasuureiden resultantit jännitysten avulla	22
3.2.2 Voimasuureiden resultantit muodonmuutosten avulla	24
3.2.3 Voimasuureiden tasapainoyhtälöt kuormituksen ollessa pyörähdys- symmetrinen	26
3.2.3.1 Voimasuureet muodonmuutosten avulla	27
3.2.4 Sylinterimäiset säiliöt	28
3.2.4.1 Neljännen kertaluvun differentiaaliyhtälö	29
3.3 Lämpötilan vaikutus sylinterimäisessä säiliössä	31
3.3.1 Tasainen lämpötilan muutos	32
3.3.2 Lämpögradientti	34
3.3.2.1 Lämpögradientti muuttuvassa seinämässä	36

4	LASKENNALLISEN TARKASTELUN PERUSTEET	38
4.1	Säiliörakenteen kuormat	38
4.2	Hydrostaattinen paine	40
4.3	Lämpökuorma	41
4.3.1	Konduktio pyörähdysymmetrisessä putkessa	42
4.4	Maanpaine	44
4.4.1	Lepopaine P_o	45
4.4.2	Aktiivinen ja passiivinen maanpaine	46
4.5	Laskentamallit	47
4.6	Mallinnuksen eteneminen	47
5	REAKTORITORNIN VARREN TARKASTELU	49
5.1	Varren rakenneratkaisun tarkastelu	49
5.2	Varren pyörähdysymmetrinen kuorielementtimalli	52
5.3	Kuormitukset	52
5.4	Kuormitusyhdistelmät	54
5.5	Voimasuureet varressa	55
5.5.1	Vapaasti tuettu varsi	55
5.5.2	Jäykästi tuettu varsi	56
5.5.2.1	Reunahäiriö varressa	56
5.5.2.2	Varren juuressa betonikerrokseen vaikuttavat voimasuureet	60
5.5.2.3	Neljän metrin päässä juuresta vaikuttavat voimasuureet	61
5.6	Varsi jännitettynä ja teräsbetonisena rakenteena	63
5.6.1	Varsi jännitettynä rakenteena	63
5.6.2	Varsi teräsbetonisena rakenteena	65
6	REAKTORITORNIN ALASÄILIÖ	67
6.1	Alasäiliön muoto	68
6.1.1	Alasäiliön muotojen 3D-mallinnukset	69
6.1.2	Alasäiliö ilman vartta	70
6.1.3	Alasäiliö varren kanssa	72
6.1.3.1	Siirtymät	72
6.1.3.2	Jännitykset	73
6.2	Alasäiliön rakenneratkaisut kaukana liitoksesta	75
6.2.1	Lujuusanalyysin reunaehdot	76
6.2.2	Lämmönsiirtoanalyysin reunaehdot	77
6.2.2.1	Maanpäällinen alasäiliö	77

6.2.2.2	Maanalainen alasäiliö	79
6.2.3	Alasäiliö maan päällä	80
6.2.3.1	Alasäiliön alustava betonikerroksen paksuuden optimointi	80
6.2.3.2	Alasäiliön lämmöneristeiden paksuuksien optimointi .	86
6.2.3.3	Alasäiliön alaosan alapinnan lämmöneristystyksen vaikutus	88
6.2.3.4	Alasäiliön alaosan betonikerroksen paksuuden optimointi	90
6.2.3.5	Alasäiliön ylä- ja alaosan lämmöneristeiden optimointi	93
6.2.4	Alasäiliö maan alla	98
6.2.5	Alasäiliön yläosa jännitettynä rakenteena	101
6.2.5.1	Jännitetty ympyrämuotoinen sylinterirakenne	101
6.2.5.2	Alasäiliötyypin AO3 yläosa jännitettynä rakenteena .	104
7	ALASÄILIÖN JA VARREN LIITOS	111
7.1	Eri kuormien vaikutukset liitokseen	112
7.1.1	Mekaanisten kuormien vaikutukset	113
7.1.2	Lämpökuorman vaikutukset	114
7.1.2.1	Lämmönsiirtoanalyysi ja alasäiliön lämpötila- jakauma	114
7.1.2.2	Lujuusanalyysin reunaehtotapaukset lämpökuorman tarkastelussa	115
7.1.2.3	Lämpöjännitysten tarkastelu liitoksessa	116
7.2	Liitoksen vahventaminen	119
7.2.1	Liitoksen laatikollinen vahvennus	119
7.2.1.1	Vahvennuksen pituuden optimointi	120
7.2.1.2	Vahvennuksen leveyden optimointi	122
7.2.1.3	Vahvennuksen korkeuden optimointi	124
7.3	Liittorakenteinen liitos	125
7.4	Teräsrakenteinen liitos	126
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	129
8.1	Reaktoritornin varsi	129
8.2	Reaktoritornin alasäiliö	131
8.3	Alasäiliön ja yläosan liitos	134
8.4	Jatkotutkimustarve	135

LIITTEET:

Liite 1: CBR-reaktorin tuulikuorman määrittäminen	8 s.
Liite 2: Varren lämpötilajakauman analyttinen laskenta stationäärisessä tilassa	2 s.
Liite 3: Varren ja yläsäiliön kuormat	7 s.
Liite 4: Vapaasti tuettu varsi	5 s.
Liite 5: Jäykästi tuettu varsi	8 s.
Liite 6: Varren raudoitusten mitoitus	7 s.
Liite 7: VSL-ankkurijännemenetelmä	1 s.
Liite 8: Kuumavalssattujen rakenneterästen myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot	1 s.
Liite 9: Alimman jännekaapelin sijainnin vaikutus.....	1 s.

ESIPUHE

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Rakennustekniikan laitokslla. Diplomityön rahoittajana on toiminut Outotec Oyj.

Diplomityön valvojana toimi Rakennustekniikan laitoksen professori TkT Jari Puttonen ja ohjaajana saman laitoksen tutkija DI Jukka Piironen. Haluan kiittää heitä tämän projektin loppuunsaattamisessa. Haluan myös kiittää kaikkia muita henkilökunnasta, jotka ovat auttaneet ja kannustaneet.

Kiitos kuuluu myös Reijo Lindgrenille sekä CSC- Tieteen tietotekniikan keskukselle Abaqus ohjelmiston akateemisesta lisenssistä ja neuvoista laskentamallien rakentamisessa.

Espoo, 15.4.2013

Yadollah Salimi

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala	$[m^2]$
A_1, A_2	vakio	$[-]$
B_1, B_2	vakio	$[-]$
a	lieriön säde	$[m]$
C	intergointivakio	$[-]$
c	koheesio	$[N/m^2]$
D	taivutusjäykkyys	$[Nm]$
E	kimmomoduuli	$[N/m^2]$
G	liukumoduuli	$[N/m^2]$
g	maan vetovoiman kiihtyvyys	$[m/s^2]$
h	korkeus	$[m]$
h_1, h_2	pinnan lämmönsiirtokerroin	$[W/m^2K]$
K_0	leoppaineen maanpaineluku	$[-]$
K_a	aktiivinen maanpaineluku	$[-]$
K_p	passiivinen maanpaineluku	$[-]$
L	lieriön seinämän paksuus	$[m]$
l_f	Kaarialkion kaaren pituus	$[m]$
M_x, M_θ	taivutusmomentti	$[Nm/m]$
M_y, M_ϕ	taivutusmomentti	$[Nm/m]$
M_{xy}	vääntömomentti	$[Nm/m]$
M_{yx}	vääntömomentti	$[Nm/m]$
N_ϕ	meridiaanin suuntainen kalvovoima	$[N/m]$
N_θ	kehänsuuntainen kalvovoima	$[N/m]$
$N_{\phi\theta}$	leikkausvoima	$[N/m]$
$N_{\theta\phi}$	leikkausvoima	$[N/m]$
N_s	meridiaanin suuntainen kalvovoima	$[N/m]$
N_{xy}	leikkausvoima	$[N/m]$
N_{yx}	leikkausvoima	$[N/m]$
N_x	normaalivoima	$[N/m]$
N_y	normaalivoima	$[N/m]$
p_o	lepopaine	$[N/m^2]$
p_a	aktiivinen maanpaine	$[N/m^2]$
p_p	passiivinen maanpaine	$[N/m^2]$
p_r	kohtisuoraan keskipintaa vastaan vaikuttava kuormitus	$[N]$
p_ϕ	meridiaanin suuntaan vaikuttava kuormitus	$[N]$
p_θ	leveysympyrän tangentin suuntaan vaikuttava kuormitus	$[N]$
p_s	meridiaanin suuntaan vaikuttava kuormitus	$[N]$
Q_y, Q_ϕ	leikkausvoima	$[N]$
Q_x	leikkausvoima	$[N]$
q	tasainen pintakuorma maanpinnalla	$[N/m^2]$
q_r	seinämän läpi kulkeva lämpövirta	$[W]$
q_T	lämpögradientin aiheuttama paine	$[N/m^2]$
q_x	lämpövirta	$[W/m^2]$

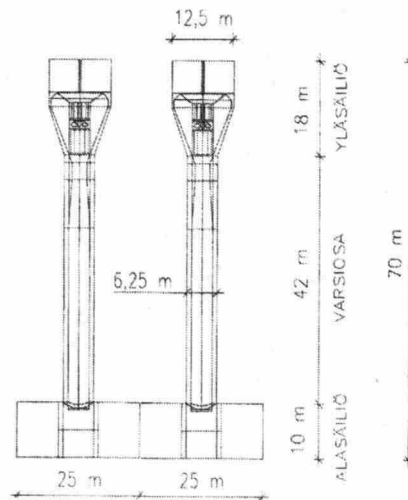
R_{cyl}	sylinteriseinämän lämmönvastus	$[^{\circ}C/W]$
r	kuoren keskipinnan vaakasuora etäisyys kuoren akselistasta	$[m]$
r_1	pääkaarevuussäde	$[m]$
r_2	pääkaarevuussäde	$[m]$
r_x	kaarevuussäde	$[m]$
r_y	kaarevuussäde	$[m]$
r_x'	deformoituneen kappaleen keskipinnan säde	$[m]$
r_1'	deformoitunut pääkaarevuussäde	$[m]$
r_2'	deformoitunut pääkaarevuussäde	$[m]$
s_y	kaaren pituus	$[m]$
s_x	kaaren pituus	$[m]$
T	lämpötila	$[^{\circ}C]$
$T_{c.a}$	rakenteen alkulämpötila	$[^{\circ}C]$
$T_{c.l}$	rakenteen loppullinen lämpötila	$[^{\circ}C]$
$T_{c.r}$	säteen r kohdalla vallitseva rakenteen lämpötila	$[^{\circ}C]$
t	rakenteen paksuus	$[m]$
u	tangentin suuntainen siirtymä	$[m]$
w	pinnan normaalin suuntainen siirtymä	$[m]$
w_0	homogeenisen funktion ratkaisu	$[m]$
w_1	differentiaaliyhtälön yksityisratkaisu	$[m]$
z	etäisyys rakenteen keskipinnasta	$[m]$
z	maanpaineen syvyys	$[m]$
α_c	materiaalin lämpölaajenemiskerroin	$[1/^{\circ}C]$
β	maanpinnan kaltevuuskulma	$[^{\circ}]$
δ	laajenema säteen suunnassa tasaisesta lämpötilan muutoksesta	$[m]$
ΔT_c	lämpötilaero rakenteen sisä- ja ulkopinnan välillä	$[^{\circ}C]$
$\Delta T_{c.cl}$	tasainen lämpötilan muutos	$[^{\circ}C]$
$\Delta T_{c.es}$	lämpötilan muutos ulkopinnassa	$[^{\circ}C]$
$\Delta T_{c.is}$	lämpötilan muutos sisäpinnassa	$[^{\circ}C]$
Δl_f	suikaleen kaaren pituuden muutos	$[m]$
ϵ_x	keskipinnan venymä x :n suuntaan	$[-]$
ϵ_y	keskipinnan venymä y :n suuntaan	$[-]$
ϵ_{ϕ}	keskipinnan venymä meridiaanin suuntaa	$[-]$
$\epsilon_{\phi 0}$	keskipinnan venymä meridiaanin suuntaan	$[-]$
ϵ_{θ}	keskipinnan venymä kehän suuntaan	$[-]$
$\epsilon_{\theta 0}$	keskipinnan venymä kehän suuntaan	$[-]$
ϵ_t	rakenteen muodonmuutos tasaisesta lämpötilan muutoksesta	$[-]$
γ	maan tilavuuspaino	$[N/m^3]$
γ_{xy}	keskipinnan liukuma	$[-]$
$\gamma_{\theta\phi}$	keskipinnan liukuma	$[-]$
ρ	väliaineen tiheys	$[kg/m^3]$
χ	kiertymiskulma	$[^{\circ}]$
κ_y	käyristymä	$[1/m]$
κ_x	käyristymä	$[1/m]$

ν	Poissonin luku	$[-]$
ϕ	pyörähdysakselin ja kaarevuussäteiden välinen kulma	$[^\circ]$
φ	maan sisäinen kitkakulma	$[^\circ]$
θ	kulma leveysympyrän tasossa	$[^\circ]$
σ_x	jännitys x -akselin suunnassa	$[\text{Pa}]$
σ_y	jännitys y -akselin suunnassa	$[\text{Pa}]$
σ_s	jännitys meridiaanin suunnassa	$[\text{Pa}]$
σ_θ	jännitys kehän suunnassa	$[\text{Pa}]$
τ_{xy}	leikkausjännitys	$[\text{Pa}]$
τ_{yx}	leikkausjännitys	$[\text{Pa}]$

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Diplomityössä tutkittu reaktoritornin tarkoituksena on toimia hydrometallurgisen prosessin ytimenä korkean hydrostaattisen paineen ansiosta. Reaktoritorni on tornimainen rakenne, jonka korkeudeksi on työssä oletettu 70 metriä. Se koostuu kolmesta eri osasta: alasäiliö, varsi ja yläsäiliö. Reaktoritornit voidaan tarvittaessa rakentaa ketjuun niin, että varsien keskinäinen välimatka on 25 metriä (kuva 1). Alasäiliö on maahan tukeutuva säiliörakenne. Se koostuu lujitemuovilieriöstä, jota ympäröi sekä lämmöneristeet että teräsbetoninen kuori. Lujitemuovilieriön sisähalkaisija on 10 metriä. Kantavana rakenteena toimiva teräsbetonikuori on sisäpinnaltaan lie-riömäinen mutta sen ulkomuoto ja mitat määräytyvät sen mukaan miten suuria rasituksia betonirakenteeseen aiheutuu. Tornin varsi on 42 metriä korkea pääosin tasapaksuinen sylinterikuori, jonka sisähalkaisija on 6.25 metriä. Varsi tukeutuu alasäiliöön keskeisesti. Tornin yläsäiliön lujitemuovisen sisähalkaisija on 12.5 metriä ja korkeus 18 metriä. Kuvassa 1 on esitetty tornin dimensi-ot. Jotta lietteen nousu reaktoritornin varteen voisi tapahtua estettä alasäiliön ja varren liitoksessa reiän pi- elien pyöristyssäde on 0.8 metriä.



Kuva 1: Reaktoritornin dimensi-ot. [1]

Tässä diplomityössä tutkitaan reaktoritornin varren juurta sekä vapaasti että jäykästi tuettuna, optimoidaan alasäiliön rakenneratkaisua ja tarkastellaan liitos- ta alasäiliön ja varren välissä. Reaktoritorniin kohdistuu sekä ulkoisia että sisäisiä rasituksia. Ulkoiset kuormat rasittavat alasäiliötä joko suoraan tai varren kautta. Ul- koisista kuormista voidaan mainita tuulikuorma, ulkoilman ja maaperän lämpötilan vaihtelut, lumikuorma sekä mahdolliset maanjäristykset. Sisäisiä rasituksia ovat liet- teen korkea lämpötila (+104 °C), kiintoaineet, lietteen happamuus ja lietteestä ai-

heutuva hydrostaattinen paine. Lietteen tiheys on 1500 kg/m^3 ja PH noin luokkaa 1.

Alasäiliö on maata vasten makaava säiliö, joten siihen vaikuttava hydrostaattinen paine ei ole pyörähdysymmetristä kuten ei myöskään lämpötilajakaumakaan. Siksi alasäiliöön kohdistuvien rasitusten ja sen geometrian asettamat vaatimukset ovat haasteelliset. Varren ja alasäiliön rakenneratkaisun optimoinnissa lähtökohtana käytettiin Al-hellon [1] varren keskiosalle määrittämää rakenneratkaisua, joka oli sisältä ulospäin: lujitemuovi - mineraalivilla - betoni - polyuretaani.

Alasäiliön ja varren välisen liitoksen rakenteellinen suunnittelu ei ole yksinkertaista. Reaktoritornissa vaikuttava suuri hydrostaattinen paine ja lämpötilavaihtelu asettavat suuren haasteen liitoksen suunnitteluun. Myös tuulikuorma ja rakenteen omapaino rasittavat liitosta ja liitoksen ympäristöä. Koska rasitukset ovat suuria, rakennekerrosten paksuuksia on paikallisesti kasvatettava liitoksen läheisyydessä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on

- tutkia reaktoritornin vartta juurestaan vapaasti ja jäykästi kiinnitettynä.
- optimoida teräsbetonisen alasäiliön rakenneratkaisua hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman suhteen.
- tutkia alasäiliön ja varren välistä liitosta ja sen vahvistamista.

Reaktoritornin vartta tutkitaan sekä ominaiskuormien että murtokuormien suhteen. Alasäiliön ja liitoksen tutkimuksessa käytetään ainoastaan ominaiskuormia. Alasäiliön optimoinnin tavoitteena on saada jännitykset alasäiliön betonissa sellaisella tavalla, että vetojännitykset voidaan tarvittaessa kumota jänneterästen avulla.

1.3 Tutkimuksen rajaus

Lämpökuorman ja happaman lietteen takia reaktoritornin rakenneratkaisut koostuvat useammasta kuin yhdestä kerroksesta. Tässä diplomityössä oletetaan, että rakennekerrosten välillä on täydellinen tartunta. Tästä syystä rakenneratkaisut edellyttävät rakenteellisen tarkastelun lisäksi myös muita kehitys- ja tutkimustöitä, kuten rakennekerrosten välisen tartunnan ja yhteistoiminnan selvittämistä. Koska alasäiliö ei kestä siihen aiheutuvia vetojännityksiä jännittämättömänä teräsbetonirakenteena, niin on tutkittava myös mahdollisuutta sijoittaa jännekaapeleita alasäiliöön.

Jännitysten ja voimasuureiden laskennassa oletetaan, että ainoastaan betonikerros toimii kantavana rakenteena. Lujitemuovin ensisijaisena tehtävänä on betonikerroksen suojaaminen reaktorin lietteen kemiallisilta vaikutuksilta. Mallinnuksessa betonikerros oletetaan homogeeniseksi ja halkeamattomaksi. Alasäiliön tuenta maaperään oletetaan laakeroiduksi ts. niiden välinen kontaktipinta oletetaan kitkattomaksi. Mahdollisia häiriö- tai onnettomuustilanteita mm. maanjäristyskuormia ei työssä tarkastella.

Reaktoritornin varren tutkimuksessa juuren reunaehdot yksinkertaistettiin vapaasti ja jäykästi tuetuiksi. Vartta tutkittiin sekä stationäärisessä että epästationäärisessä tilassa lämpökuormien suhteen. Työssä tarkastellaan alasäiliötä sekä käyttötilassa (lämpökuorma on stationäärinen) että reaktorin käynnistysvaiheessa (lämpökuorma on epästationäärinen). Alasäiliö tarkastellaan sekä maan päällisenä että maanalaisena rakenteena. Alasäiliö on kosketuksessa maaperään vähintään alapinnastaan. Alasäiliö tutkitaan kaukana alasäiliön ja varren liitoksen häiriöalueelta niin, että reunahäiriön vaikutukset on tutkimuksessa jätetty pois. Kaikkien kuormien vaikutukset mm. tuulikuorman, omanpainon ja lämpökuorman ja hydrostaattisen paineen vaikutuksia tarkastellaan, mutta liitoksen vahvennusta optimoidaan ainoastaan hydrostaattisen paineen suhteen. Teräksisen pinnan vaikutus betonirakenteisiin vaikeuttaviin jännityksiin tarkastellaan olettaen betonin ja teräksen välille täydellinen tartunta.

1.4 Tutkimuksen sisältö

Tutkimus sisältää katsauksen reaktoritornin varren keskiosalle kohdistuneista aiemmista tutkimuksista, kirjallisuuskatsauksen kuorirakenteista ja reaktoritornin laskennallisesta tarkastelusta. Kirjallisuuskatsauksessa keskitytään pyörähdyssymmetriseen lieriömäisen kuorirakenteen mitoittamiseen pyörähdyssymmetristen ja lämpökuorman alaisena. Laskennallinen tarkastelu sisältää rakenteen tarkastelun käsilaskennalla ja elementtimenetelmään perustuvalla Abaqus-tietokoneohjelmistolla. Laaskennallisessa tarkastelussa tarkastellaan:

- reaktoritornin vartta käyttörajatilassa ja murtorajatilassa juurestaan vapaasti ja jäykästi tuetussa tapauksessa.
- alasäiliötä kaukana liitoksesta hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman ominaiskuormien alaisena.
- alasäiliön ja varren välistä liitosta.

Laskennallisessa tarkastelussa keksitytään eniten alasäiliön rakennertakaisujen optimointiin. Tutkimuksen pääpaino on laskennallisessa osuudessa.

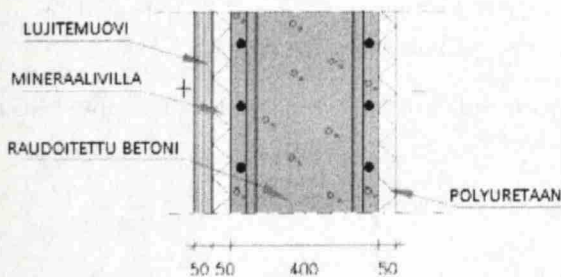
2 AIEMMAT TUTKIMUKSET

Aiemmissa tutkimuksissa on keskitytty reaktoritornin varren keskiosan rakenneratkaisujen määrittelyyn [1] [15]. Tutkimuksissa tarkasteltiin varren keskikohtaa samanlaisten rasitusten alaisena. Tarkasteltuihin kuormiin sisältyi varren omapaino, tuulikuorma, yläsäiliön omapaino ja siihen kohdistuvasta tuulikuormasta aiheutuvat taivutusmomentti ja leikkausvoima, lumikuorma, sisäpuolisen lietteen aiheuttama hydrostaattinen paine sekä lämpötilaero betonikuoren sisä- ja ulkopinnan välillä.

Jauhianen tutki diplomityössään [15] kahta eri reaktoritornin varren rakennetyyppejä: raudoitettu betoni sisäpuolisella pinnoitteella ja lujitemuovi-betoni-lujitemuovi-liittorakenne. Jauhianen esitti lämpökuormalla olevan keskeisen roolin reaktoritornin varren mitoituksessa ja suunnittelussa seuraavin johtopäätöksiin:

- Lämpökuormista aiheutuvien vetojännitysten hallinnalla voidaan oleellisesti vaikuttaa rauditusmääriin ja rakennepaksumuksiin.
- Betonin lujuuden kasvattamisella tai tornin alareunan reunaehtojen muuttamisella ei ollut oleellista vaikutusta jännitysten pienentämisessä.
- Betonikuoren pintojen välisen lämpötilaeron pienentäminen lämmöneristein ja betonikuoren poikkeileikkauksen ohentaminen pienentävät lämpöjännityksiä.
- Rakenteeseen sijoitetuilla esijännityskaapeleilla ei voida kumota eristämättömän poikkileikkauksen ulkopintaan hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta syntyviä vetojännityksiä. [15]

Al-Hello optimoi varren rakenneratkaisuja lämpöjännitysten ja betonipintojen pitkäaikaisen suositellun lämpötilan ($\leq 65\text{ °C}$) suhteen talviolosuhteissa. Al-Hellon optimoidussa rakenneratkaisussa rakennekerrokset olivat sisältäpäin lukien: 50 mm lujitemuovikerros, 50 mm mineraalivillakerros, 400 mm betonikerros ja 50 mm polyuretaanikerros, joista betonikerros toimi kantavana rakenteena. Alla olevassa kuvassa on esitetty Al-Hellon optimoitu rakenneratkaisu.

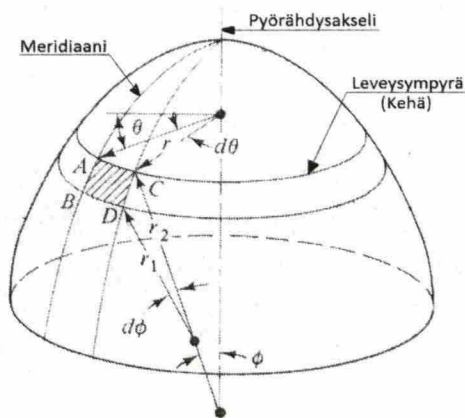


Kuva 2: Al-Hellon reaktoritornin varsiosan keskikohdalle lämpökuorman suhteen optimoitu rakenneratkaisu, jossa rakennekerrokset ovat sisältäpäin lukien seuraavasti: 50 mm lujitemuovi - 50 mm mineraalivilla - 400 mm raudoitettu betoni - 50 mm polyuretaani. [1]

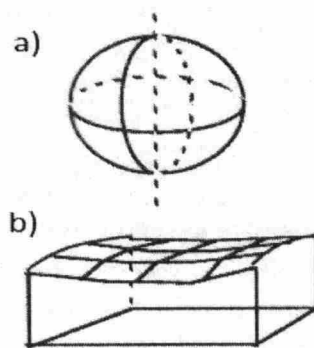
3 KUORI RAKENTEENA

Kuorella tarkoitetaan lujusopissa levymäistä, käyräpintaista kappaletta, jonka paksuus on pieni verrattuna kuoren muihin mittoihin ja jonka seinämän keskipinnan muoto on mielivaltainen. Pyörähdysymmetriset kuoret ovat yleisiä kuorirakenteita, joista voidaan mainita mm. pyörähdysellipsoidi, ympyräkartio ja ympyräsylinteri. [4] Kuoret, joiden seinämän paksuuden ja säteen mittasuhte on pienempi tai yhtä suuri kuin $1/20$ luetellaan ohuiksi kuoreiksi. [24]

Kuorien keskipinnat ovat usein matemaattisesti yksinkertaisia geometrisia pintoja. Ulkoinen kuormitus voi vaikuttaa kuoren keskipintaan nähden missä suunnassa tahansa. Kuoren keskipinnan mielivaltaisen pisteen kaarevuus voidaan määrittää pääkaarevuussäteiden r_1 ja r_2 avulla (kts. kuva 3). Pääkaarevuussäteiden keskipisteet voivat sijaita keskipinnan samalla puolella (pallokuori) tai eripuolilla (hyperbolinen paraboloidi) (kts. kuva 4). [11]



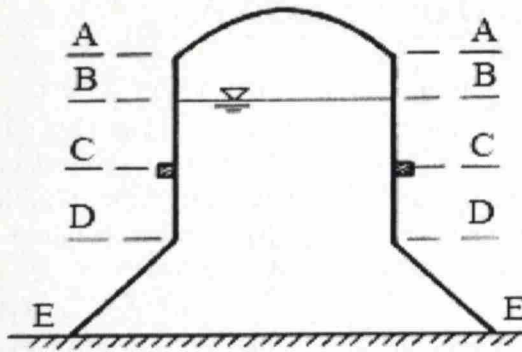
Kuva 3: Pyörähdyskuoren merkintöjä. [24]



Kuva 4: Kuorimallit (a) pallokuori (b) hyperbolinen paraboloidi. [11]

Mikäli kuoren kuorma aiheutuu vain nesteen tai kaasun paineesta, kuormitus on kuoren jokaisessa pisteessä kohtisuorassa pintaa vastaan. Käyräpintaissa kuoreissa keskipintaa vastaan sekä kohtisuoria että sen suuntaisia jännitys- ja muodonmuutoskomponentteja on käsiteltävä yhtä aikaa. [4]

Kuorirakenteiden analysointi käsittää usein kaksi erilaista yleisesti käytössä olevaa teoriaa: kalvoteoria ja taivutusteoria. Kalvoteoria koskee joko koko rakenteen analysointia tai suurinta osaa siitä olipa rakenne minkä muotoinen tahansa. Kalvoteoriolla ei pystytä määrittämään taivutusmomentteja eikä leikkausvoimia. Taivutusteoria käsittää taivutuksen vaikutuksia. Näin ollen se mahdollistaa epäjatkovien jännitysten tutkimista rajatulla alueella kuormien tai rakenteellisten epäjatkovuuksien läheisyydessä (kts. kuva 5). [24]



Kuva 5: Pyörähdyskuoren häiriöviivoja [17]

Tapauksissa, joissa siirtymät ja kiertymät ovat rajoitettuja tai poikkileikkauksen muoto muuttuu äkillisesti tai geometrian muoto muuttuu, esimerkiksi sylinterikuoren liittyessä pallomaiseen kuoreen, kalvoteoria ei yksinään ole enää kelvollinen. Edellä mainituissa tapauksissa on käytettävä taivutustilateoriaa siirtymien ja kiertymien rajoittamisesta aiheutuvien voimasuureiden mm. taivutusmomenttien ja leikkausvoimien laskennassa. Kiertymien ja siirtymien rajoittamisesta syntyy paikallinen reunahäiriö, joka vaimenee nopeasti reunasta poispäin mentäessä. [7]

Kuoressa voi esiintyä keskipinnan suuntaisia sisäisiä voimia sekä sisäisiä taivutusmomentteja ja leikkausvoimia. Kuoren sulkeutuminen pyörähdyskuoreksi ja tästä seuraava kehäjännitys vähentää tehokkaasti kuoren sisäisiä taivutusrasituksia vaikka kuoreen vaikuttaisi keskipintaa vastaan kohtisuora kuormitus. Tämä voisi johtua kuoren keskipinnan pienestä kaarevuudesta. [11]

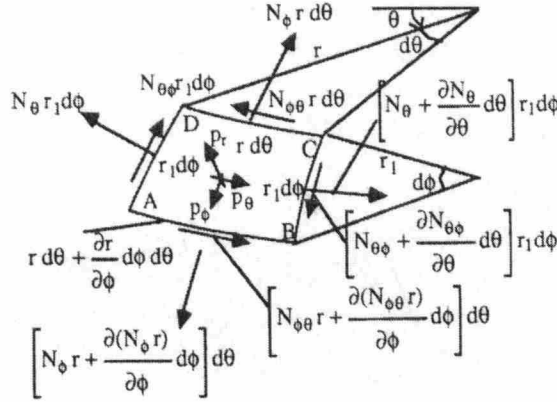
Ohuiden kuorien pienten siirtymien teorian oletukset ovat: [11]

- Siirtymät ovat pieniä.
- Kuoren materiaali on elastista, ja isotrooppista.
- Kuoren materiaali noudattaa Hooken lakia.
- Keskipintaa vastaan kohtisuorat normaalijännitykset ovat merkityksettömiä keskipinnan suuntaisiin jännityksiin verrattuna.
- Keskipintaa vastaan kohtisuorat normaalit pysyvät kohtisuorassa keskipintaa vastaan taipuman jälkeen.

3.1 Pyörähdyskuoren kalvotila

Ohuessa kuoressa, jossa ei esiinny äkkinäistä muutosta sen seinämän paksuudessa, kaltevuudessa tai kaarevuudessa, vallitsee puhdas kalvotila [24]. Puhtaassa kalvotilassa kuoressa esiintyy ainoastaan keskipinnan suuntaisia sisäisiä kalvovoimia:

meridiaanin suuntainen kalvovoima N_ϕ , kehän suuntainen kalvovoima N_θ ja leikkausvoimat $N_{\phi\theta}$ ja $N_{\theta\phi}$. Kalvotila on sisäisesti staattisesti määrätty. Mikäli kuori on paksu, ei puhdasta kalvotilaa voida saavuttaa. [11] Kuvassa 6 on esitetty kuvassa 3 esitettyssä alkiossa ABCD vaikuttavat sisäiset voimasuureet kalvotilassa.



Kuva 6: Kuoren alkio ABCD ja siihen vaikuttavat kalvovoimat. [11]

Tarkasteltaessa kuvassa 6 olevaa kuorialkiota ABCD, jonka kuormitus on mielivaltainen, alkion voimatasapainoehdot voidaan sieventää meridiaanin tangentin, leveysympyrän tangentin ja pinnan normaalin suunnalle seuraavasti [11]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\phi r}{\partial \phi} - N_\theta r_1 \cos \phi + \frac{\partial N_{\theta\phi} r}{\partial \phi} + p_\phi r_1 r &= 0, \\ \frac{\partial N_{\theta\phi} r}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{\phi\theta} r}{\partial \phi} + N_{\phi\theta} r_1 \cos \phi + p_\theta r_1 r &= 0, \\ N_\phi r + N_\theta r_1 \sin \phi - p_r r_1 r &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

missä,

- r leveysympyrän säde $[m]$,
- r_1 meridiaanin kaarevuussäde (ensimmäinen pääkaarevuussäde) $[m]$,
- N_ϕ meridiaanin suuntainen kalvovoima $[N]$,
- N_θ kehän suuntainen kalvovoima $[N]$,
- $N_{\theta\phi}$ leikkausvoima $[N]$,
- $N_{\phi\theta}$ leikkausvoima $[N]$,
- p_r kohtisuoraan keskipintaa vastaan vaikuttava kuormitus $[N]$,
- p_ϕ meridiaanin suuntaan vaikuttava kuormitus $[N]$,
- p_θ leveysympyrän tangentin suuntaan vaikuttava kuormitus $[N]$,
- ϕ pyörähdysakselin ja kaarevuussäteiden välinen kulma $[\circ]$
- θ kulma leveysympyrän tasossa $[\circ]$ ja

Yhtälöryhmän 1 kolmesta tasapainoyhtälöstä voidaan ratkaista kolme tuntematonta kalvovoimaa N_ϕ , N_θ ja $N_{\phi\theta}$. Koska tehtävän ratkaisemiseen riittää pelkästään tasapainoyhtälöt, rakenne on staattisesti määrätty. [17]

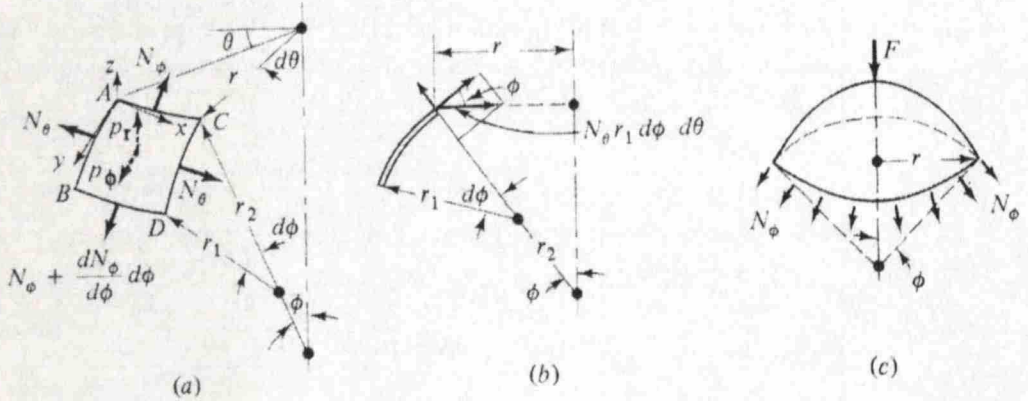
3.1.1 Pyörähdyskuoren kalvotila pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa

3.1.1.1 Kalvovoimat

Pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa kuoreen ei synny leikkausvoimia, siihen vaikuttaa ainoastaan kaksi kalvovoimaa N_ϕ ja N_θ . Kuorimallin pyörähdyssymmetrian takia kalvovoimat ja kuormitus eivät ole riippuvaisia kulmanmuutoksesta θ . Edellisten seikkojen perusteella ja huomioiden, että $r=r_2 \sin \phi$ tasapainoyhtälöt 1 voidaan ilmaista seuraavasti: [17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\phi r}{\partial \phi} - N_\theta r_1 \cos \phi + p_\phi r_1 r &= 0, \\ \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} - p_r &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Kuvassa 7 on esitetty kalvotilan voimasuureet pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa.



Kuva 7: Kalvotilan voimasuureet pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa. [24]

Kalvovoimat N_ϕ ja N_θ voidaan ratkaista edellisistä tasapainoyhtälöistä (2) muotoon

$$N_\theta = r_2 \left[p_r - \frac{N_\phi}{r_1} \right], \quad (3)$$

$$N_\phi = \frac{1}{r \sin \phi} \left[\int r_1 r (p_r \cos \phi - p_\theta \sin \phi) d\phi + C \right], \quad (4)$$

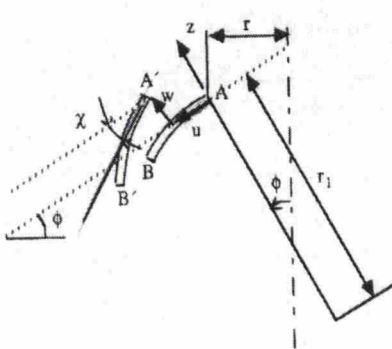
missä C on integrointivakio.

3.1.1.2 Venymät ja siirtymät

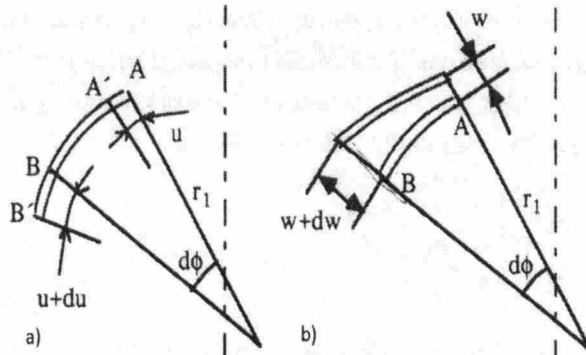
Keksipinnan venymät saadaan laskettua kalvovoimista. Koska kuormitus on pyörähdyssymmetrinen ja leikkausvoima saa arvon nolla, niin tästä syystä liukumakin saa arvon nolla. Alla olevassa kaavoissa esitetään keksipinnan venymät kalvovoimien funktiona [17]:

$$\begin{aligned}\epsilon_\phi &= \frac{1}{Et}(N_\phi - \nu N_\theta), \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{Et}(N_\theta - \nu N_\phi), \\ \gamma_{\theta\phi} &= \frac{2(1+\nu)}{Et}N_{\theta\phi} = 0.\end{aligned}\tag{5}$$

Jos kuorirakenne on pyörähdyssymmetrisesti kuormitettu, kuorirakenne deformoituu symmetrisesti. Tarkastellaan kuvassa 8 olevaa vapaata pituusyksikköä AB, joka on osa kuorirakenteen meridiaania. [11] Kuoren muodonmuutokset voidaan esittää meridiaanin tangentin suuntaisen siirtymän u ja kuoren keskipintaa kohtisuorassa olevan normaalin suuntaisen siirtymän w funktioina. Kaaren yksikköpituus on $r_1 d\phi$. [24]



Kuva 8: Kaarialkion siirtymät. [11]



Kuva 9: Siirtymän u aiheuttama muodonmuutos (a) ja siirtymän w aiheuttama muodonmuutos (b). [11]

Leveysympyrän suunnassa muodonmuutos on säteen suunnassa. Mutta kuitenkin kehän suuntainen venymä ϵ_θ syntyy. Oletetaan meridiaanin tangentin suuntainen siirtymä u ja pinnan normaalin suuntainen siirtymä w pieniksi. Näin voidaan tarkastella näiden vaikutuksia meridiaanin suuntaiseen venymään ϵ_ϕ ja kiertymiskulmaan χ erikseen ja laskea yhteisvaikutus yhteen. Kuvissa 8 ja 9 on havainnollistettu yhtälöryhmässä (6) esiintyvät muodonmuutosparametrit. [11]

Kalvotilan venymä $\epsilon_{\theta 0}$ saadaan tarkastelemalla säteen r muutosta pisteessä A. Siirtymä u aiheuttaa kaarialkioon venymän $\epsilon_{\phi u}$ ja pisteessä A kiertymiskulman χ_u .

Siirtymä w taas aiheuttaa pisteessä A meridiaanin suuntaisen venymän $\epsilon_{\phi w}$ ja kiertymiskulman χ_w . Täten kalvotilan venymät $\epsilon_{\theta 0}$, $\epsilon_{\phi 0}$ ja kiertymä χ ovat seuraavasti: [11]

$$\begin{aligned}\epsilon_{\theta 0} &= \frac{dr}{r} = \frac{u \cos \phi + w \sin \phi}{r_2 \sin \phi} = \frac{1}{r_2} (u \cot \phi + w), \\ \epsilon_{\phi 0} &= \epsilon_{\phi u} + \epsilon_{\phi w} = \frac{1}{r_1} \frac{du}{d\phi} + \frac{w}{r_1} = \frac{1}{r_1} \left(\frac{du}{d\phi} + w \right), \\ \chi &= \chi_u + \chi_w = \frac{u}{r_1} - \frac{1}{r_1} \frac{dw}{d\phi} = \frac{1}{r_1} \left(u - \frac{dw}{d\phi} \right).\end{aligned}\tag{6}$$

Siirtymät u ja w voidaan esittää venymien avulla kaavoja (6) hyväksi käyttäen. Eliminoimalla yhtälöryhmän (6) kahdesta ensimmäisestä kaavasta siirtymän w saadaan tangentialinen siirtymä u venymien funktiona. Siirtymät u ja w saadaan alla olevista kaavoista:

$$\begin{aligned}u &= \sin \phi \left[\int \frac{1}{\sin \phi} (r_1 \epsilon_{\phi 0} - r_2 \epsilon_{\theta 0}) d\phi + C \right] \\ w &= -u \cot \phi + r_2 \epsilon_{\phi 0}.\end{aligned}\tag{7}$$

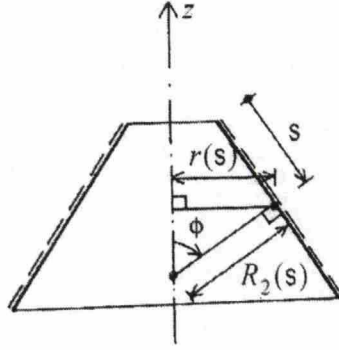
3.1.1.3 Kartiokuori ja lieriö pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa

Kartiokuoren meridiaanit ovat suoria joten $r_1 = \infty$ ja kulma ϕ on vakio. Uudeksi koordinaatiksi valitaan etäisyys s kartion kärjestä (kts. kuva 10). Alla on esitetty aiemmin käytetyt kulmasta ϕ riippuvat merkinnät kartiokuoreen soveltuvaksi muokattuna s :n funktiona.

$$\begin{aligned}r_2 &= s \cot \phi & r &= s \cos \phi & d\phi &= \frac{ds}{r_1} \\ N_\phi &= N_s & p_\phi &= p_s\end{aligned}\tag{8}$$

Sijoittamalla yllä mainitut merkinnät kaavaan (4) ja $r_1 = \infty$ kaavaan (3) saadaan kartiokuorelle kehän ja meridiaanin suuntaiset voimasuureet N_θ ja N_s seuraavasti:

$$\begin{aligned}N_\theta &= p_r s \cot \phi, \\ r N_s &= - \int (p_s - p_r \cot \phi) r ds + C.\end{aligned}\tag{9}$$



Kuva 10: Kalvotilan voimat pyörähdysymmetrisessä kuormituksessa. [?]

Lieriökuoren tapauksessa kulma ϕ saa arvon 90° joten kalvovoimat N_θ ja N_s yksinkertaistuvat muotoon:

$$\begin{aligned} N_\theta &= p_r s, \\ r N_s &= - \int (p_s - p_r) r ds + C. \end{aligned} \quad (10)$$

Kalvotilassa olevan kuoren jännitykset lasketaan kaavoista $\sigma_s = N_s/t$ ja $\sigma_\theta = N_\theta/t$, sen jälkeen kun normaalivoimat on laskettu.

3.2 Pyörähdyskuoren taivutustila

Koska kuoren kalvotilassa oletettiin, että taivutusmomentit ja leikkausvoimat pyörähdysymmetrisessä tilassa ovat nollia, pystyttiin ratkaisemaan minkä tahansa muotoisia kuorirakenteita tasapainoyhtälöistä. Mikäli edellä mainitut oletukset eivät täydy, ollaan taivutustilassa. Koska staattiset tasapainoehdot eivät enää riitä voimasuureiden määrittämiseen, kuori on staattisesti määräämättömässä tilassa. [4]

Taivutustilassa olevan kuoren osittaisdifferentiaaliyhtälöiden yhtälöryhmät on melkein mahdotonta ratkaista, mikäli kuormitus on epäsymmetrinen. Tästä syystä on turvauduttava likiteorioihin tai numeeriseen ratkaisuun. Kuormituksen ollessa pyörähdysymmetrinen, voidaan johtaa analyyttinen ratkaisu useille kuorityypeille mm. sylinterikuori, kartiokuori ja pallokuori. [17]

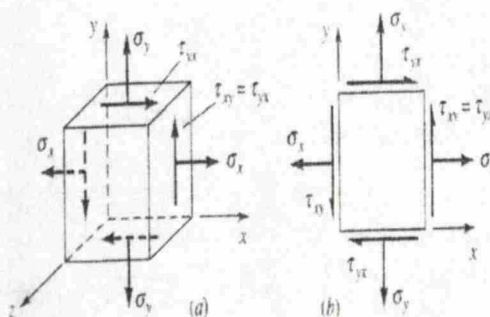
Kuoriteoriassa, jossa sekä kalvotilan että taivutustilan suureet ovat mukana, on esitettävä viisi osavaihetta [11]:

1. Siirtymistä muodostetaan venymät geometrisella tarkastelulla.
2. Venymistä siirrytään jännityksiin Hooken lain avulla.

3. Jännityksistä muodostetaan resultoivat voimasuureet (taivutusmomentit ja leikkausvoimat) integroimalla.
4. Resultoivien voimasuureiden ja ulkoisen kuormituksen avulla muodostetaan voimatasapainoehdot, mikä johtaa neljännen luvun osittaisdifferentiaaliyhtälöön ympyräsylinterin kohdalla siirtymän suhteen.
5. Osittaisdifferentiaaliyhtälö ratkaistaan reunaehdot huomioon ottaen.

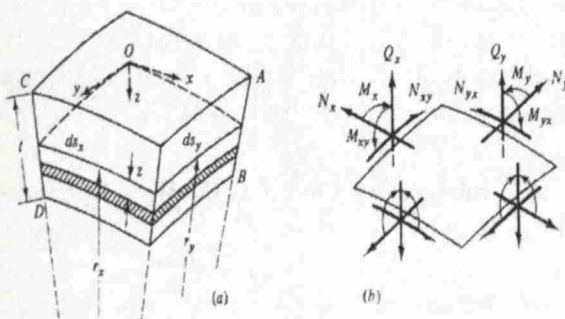
3.2.1 Voimasuureiden resultantit jännitysten avulla

Kaksidimensioisessa jännitystasossa (tasojännitys) ainoastaan x ja y -akselien suuntaisissa pinnoissa vaikuttaa jännityksiä. Jännitykset ovat yhdensuuntaisia kuin akselien kanssa. Kuvassa 11 on esitetty alkion pinnoissa vaikuttavat jännitykset tasojännitystilassa. [24]



Kuva 11: Alkion pinnoissa vaikuttavat jännitykset tasojännitystilassa. [24]

Alkion pinnoissa vaikuttavia jännityksiä σ_x , σ_y , τ_{xy} ja τ_{yx} voidaan käyttää voimasuureiden ilmaisemiseen. Vaikka $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, voimasuureparit N_{xy} , N_{yx} ja M_{xy} , M_{yx} eivät ole samansuuruisia mikäli $r_x \neq r_y$. Mutta tapauksessa jolloin elementin paksuus on hyvin pieni verrattuna kuoren säteisiin, z/r_x ja z/r_y lähestyvät nollaa (kts. kuva 12). Tästä syystä $N_{xy} = N_{yx}$ ja $M_{xy} = M_{yx}$. [24]



Kuva 12: Kuorialkioon ABCD vaikuttavat voimasuureet. [24]

Kuvassa 12 on esitetty äärettömän pieni kuorialkio, jonka katkaistut pinnat ovat keskipinnan normaalit. Karteesisessa (suorakulmainen) koordinaatistossa x ja y ovat kaarien tangentit ja z on kohtisuora keskipintaa vastaan. Lausekkeet voidaan johtaa voimasuureiden resultanteille sisäisten jännitysten kautta. Kuoren kaarevuuden vuoksi alkion kaaren pituudet ds_x ja ds_y eivät pysy samana z matkan etäisyydellä elementin keksipinnalta mitattuna. Tällöin alkion kaaren pituudet ovat: (kuva 13) [24]

$$\left(1 - \frac{z}{r_x}\right)ds_x = (1 - z\kappa_x)ds_x, \quad \left(1 - \frac{z}{r_y}\right)ds_y = (1 - z\kappa_y)ds_y. \quad (11)$$

Normaalivoimaresultantti N_x vaikuttaa alkion pinnassa yz -pituusyksikköä kohti. Käyttäen alkion kaaren todellista pituutta muodostetaan yhteys normaalivoimaresultantin ja sen aiheuttaman alkion pinnassa x -suunnassa vaikuttavan jännityksen välille, joka on

$$N_x ds_y = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x (1 - z\kappa_y) ds_y dz. \quad (12)$$

Jakamalla tämä ds_y :llä saadaan normaalivoimaresultantiksi

$$N_x = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x (1 - z\kappa_y) dz. \quad (13)$$

Käyttämällä samaa periaatetta voidaan ilmaista muutkin voimasuureresultantit jännitysten suhteen. Näin kuvassa 12 olevat voimasuureresultantit voidaan kirjoittaa: [24]

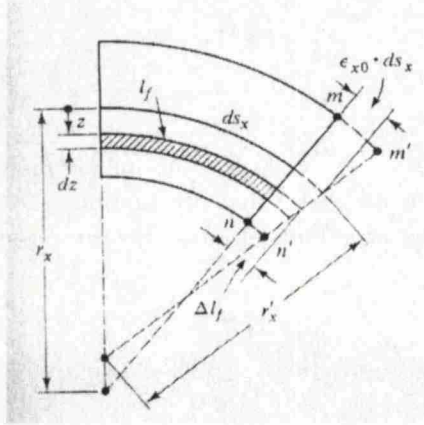
$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x (1 - z\kappa_y) \\ \sigma_y (1 - z\kappa_x) \\ \sigma_{xy} (1 - z\kappa_y) \\ \tau_{xz} (1 - z\kappa_y) \\ \tau_{yz} (1 - z\kappa_x) \end{pmatrix} dz, \quad \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x (1 - z\kappa_y) \\ \sigma_y (1 - z\kappa_x) \\ \sigma_{xy} (1 - z\kappa_y) \end{pmatrix} z dz. \quad (14)$$

Hooken laki määrittää jännitykset muodonmuutosten suhteen seuraavasti: [11]

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x), \\ \tau_{xy} &= \gamma_{xy} G. \end{aligned} \quad (15)$$

3.2.2 Voimasuureiden resultantit muodonmuutosten avulla

Yhtälöissä (15) esiintyvien jännitysten ratkaisemiseksi, on määritettävä ensin kuoressa tapahtuvat muodonmuutokset. Oletettiin, että keskipintaa vastaan olevat normaalit pysyvät kohtisuorassa keskipintaa vastaan deformatuneessa tilassakin (kts. kuva 13).



Kuva 13: Keskipinnan deformatuminen. [24]

Kuvassa 13 ehjät viivat esittävät deformatumattoman elementin rajat ja vastaavasti katkoviivat deformatuneen kappaleen rajat. Kuvan 13 perusteella voidaan määrittää l_f -pituisen kuorialkion muodonmuutosta xz -koordinaatostossa z -matkan päässä kuoren keskipinnasta, joka on: [24]

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\Delta l_f}{l_f}, \\ l_f &= ds_x \left(1 - \frac{z}{r_x}\right), \\ \Delta l_f &= ds_x (1 + \epsilon_{x0}) \left(1 - \frac{z}{r'_x}\right) - l_f. \end{aligned} \quad (16)$$

missä

- ϵ_{x0} elementin keskipinnan muodonmuutos x -suunnassa kalvotilassa [-],
- r'_x deformatuneen kappaleen keskipinnan säde [m] ja
- ds_x kuorialkion keskipinnan kaarenpituus [m].

Puhtaassa kalvotilassa olevan jännitysten ratkaisemiseen ei tarvita muodonmuutoksia. Mutta taivutustilassa olevassa kuoressa, jota kuormittaa myös kalvotilan kuormitus, tarvitaan reunaehtojen asettamisessa tietoja siirtymistä ja kiertymistä eli tarvitaan myös kalvotilan muodonmuutoksia. [11]

Kuorielementissä oletuksena on se, että $t \ll r_x$, joten z/r_x lähestyy nollaa. Sijoittamalla yhtälöryhmän 16 kaksi viimeistä kaavaa ensimmäiseen kaavaan ja olettamalla, että ϵ_{x0} :n vaikutus on merkityksetön rakenteen käyristymisessä, saadaan taivutustilan x-suuntaiselle muodonmuutokselle ϵ_x (kts. kaava 17). Samalla periaatteella saadaan muodonmuutos y-suuntaiselle muodonmuutokselle. Taivutustilassa olevan kuoren liukumakin voidaan esittää keskipinnalla vaikuttavan liukuman γ_{xy0} ja keskipinnan vääntymän γ_{xy} tuloksena. Kuoren muodonmuutokset voidaan esittää seuraavasti:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \epsilon_{x0} - z\left(\frac{1}{r'_x} - \frac{1}{r_x}\right) = \epsilon_{x0} - z\kappa_x, \\ \epsilon_y &= \epsilon_{y0} - z\left(\frac{1}{r'_y} - \frac{1}{r_y}\right) = \epsilon_{y0} - z\kappa_y, \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy0} - 2z\kappa_{xy},\end{aligned}\tag{17}$$

missä ϵ_{x0} ja ϵ_{y0} ovat keskipinnan muodonmuutokset kalvotilassa

$$\begin{aligned}\epsilon_{x0} &= \frac{1}{r_1}\left(\frac{du}{dx} + w\right), \\ \epsilon_{y0} &= \frac{1}{r_2}(u\cot(\phi) + w),\end{aligned}\tag{18}$$

ja κ on keskipinnan kaarevuudenmuutos. Näin ollen kappaleen muodonmuutos missä tahansa pisteessä keskipinnan normaalin suunnassa johtuu keskipinnan venymästä ja keskipinnan kaarevuudenmuutoksesta. Sijoittamalla yhtälöt (17) yhtälöihin (15) saadaan jännitykset lausuttua muodonmuutosten ja kaarevuusmuutosten funktiona [24]:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{x0} + \nu\epsilon_{y0} - z(\kappa_x + \nu\kappa_y)), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{y0} + \nu\epsilon_{x0} - z(\kappa_y + \nu\kappa_x)), \\ \tau_{xy} &= (\gamma_{xy0} - 2z\kappa_{xy})G.\end{aligned}\tag{19}$$

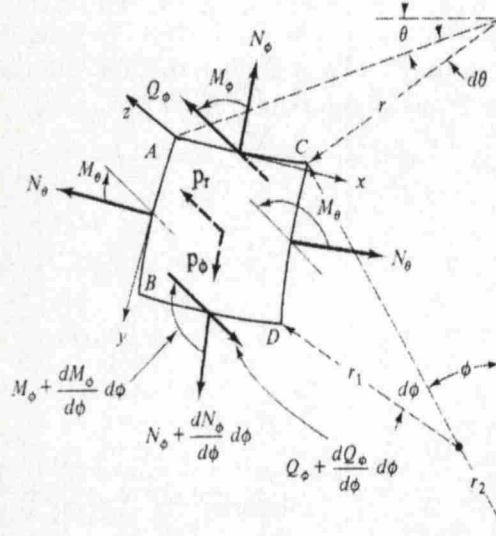
Oletetaan, että $t \ll r_x$ ja $t \ll r_y$. Sijoittamalla jännitykset kuoren sisäisten voimasuureiden laskukaavoihin (14) ja integroimalla yhtälöt t :n suhteen saadaan resultoivat sisäiset voimasuureet, jotka ovat: [11]

$$\begin{aligned}
N_x &= \frac{Et}{1-\nu^2}(\epsilon_{x0} + \nu\epsilon_{y0}), \\
N_y &= \frac{Et}{1-\nu^2}(\epsilon_{y0} + \nu\epsilon_{x0}), \\
M_x &= -D(\kappa_x + \nu\kappa_y), \\
M_y &= -D(\kappa_y + \nu\kappa_x), \\
N_{xy} = N_{yx} &= \frac{\gamma_{xy0}Et}{2(1+\nu)}ja \\
M_{xy} = M_{yx} &= -D(1-\nu)\kappa_{xy},
\end{aligned} \tag{20}$$

missä kuoren taivutusjäykkyys $D = Et^3/12(1-\nu^2)$.

3.2.3 Voimasuureiden tasapainoyhtälöt kuormituksen ollessa pyörähdys-symmetrinen

Pyörähdyskuoren voimakomponenttien tasapainoyhtälöt voidaan johtaa tutkimalla pyörähdyssymmetrisesti kuormitettua ABCD-alkiota (kts. kuva 14). Kuoren ollessa pyörähdyssymmetrinen ja pyörähdyssymmetrisessä kuormituksessa, ainoastaan voimaresultantit Q_ϕ , M_θ , M_ϕ , N_θ ja N_ϕ vaikuttavat siihen. Taivutusmomentti M_θ ja normaaliveima N_θ eivät enää ole riippuvaisia kulmasta θ . [24]



Kuva 14: Pyörähdyssymmetrisesti kuormitettua alkiota rasittavat voimasuureet. [24]

Tasapainottamalla alkion voimasuureet A-pisteessä meridiaanin ja normaalin suunnille sekä momenttiehto leveysympyrän (x -akselin) suhteen tasapainoyhtälöt voidaan johtaa yleiseen muotoon seuraavasti:

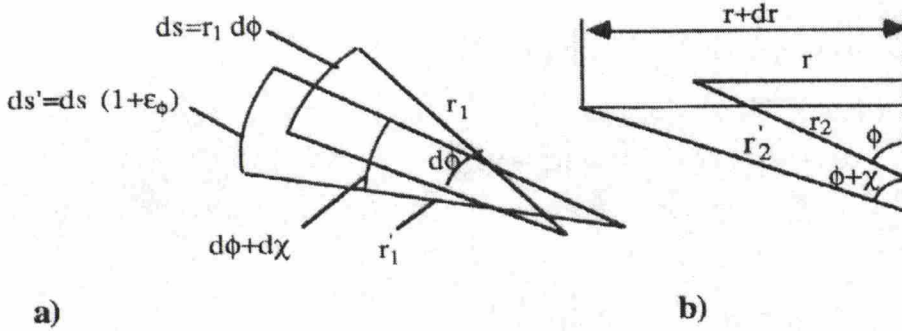
$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_\phi r}{\partial \phi} - N_\theta r_1 \cos \phi + Q_\phi r + p_\phi r_1 r &= 0, \\
N_\phi r + N_\theta r_1 \sin \phi + \frac{dQ_\phi r}{d\phi} - p_r r r_1 &= 0, \\
\frac{M_\phi r}{d\phi} - M_\theta r_1 \cos \phi - Q_\phi r r_1 &= 0.
\end{aligned} \tag{21}$$

Tasapainoyhtälöt 21 yksinkertaistuvat kalvotilan kaavoiksi jos Q_ϕ , M_ϕ ja M_θ jätetään pois. [11]

3.2.3.1 Voimasuureet muodonmuutosten avulla

Tasapainoyhtälöryhmässä (21) on viisi tuntematonta (N_θ , N_ϕ , Q_ϕ , M_ϕ ja M_θ) ja kolme tasapainoyhtälöä. Jotta voidaan vähentää tasapainoyhtälöiden tuntemattomia kolmeen, normaalivoimat (N_θ , N_ϕ) ja taivutusmomentit (M_θ , M_ϕ) on esitettävä siirtymien (v , w) funktioina. [24]

Kiertymiskulmaa voidaan käyttää kaarevuuden muutoksien esittämiseen, jotta saadaan tarkastelemalla pääkaarevuussäteiden muuttumista ennen kuormitusta olevista arvoista r_1 ja r_2 kuormituksen jälkeisiin arvoihin r'_1 ja r'_2 (vrt. kuva 15). [11]



Kuva 15: Pääkaarevuussäteiden r_1 (a) ja r_2 (b) muutos. [11]

Kuvan 15 avulla kaarevuuden muutokset voidaan esittää kiertymiskulman suhteen seuraavasti: [11]

$$\begin{aligned}
\kappa_\phi &= \frac{r_1}{r'_1} - \frac{1}{r_1} = \frac{d\phi + d\chi}{ds(1 + \epsilon_\phi)} - \frac{1}{r_1} \approx \frac{1}{r_1} \frac{d\chi}{d\phi}, \\
\kappa_\theta &= \frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{\sin(\phi + \chi)}{(1 + dr)} - \frac{\sin \phi}{r} \\
&\approx \frac{\sin \phi \cos \chi + \cos \phi \sin \chi - \sin \phi}{r} \approx \frac{\chi}{r_2} \cot \phi,
\end{aligned} \tag{22}$$

joissa on otettu huomioon, että $\epsilon_\phi \ll 1$, $\cos\chi \approx 1$, $\sin\chi \approx \chi$ ja $r = r_2 \sin\phi$. Siirtymien ollessa pyörähdysymmetriset kaarevuuden muutokset voidaan esittää siirtymien avulla sijoittamalla kiertymiskulma (6) yhtälöihin (22). [11] Pyörähdysymmetriset siirtymät saadaan pyörähdyskuoressa pyörähdyskuormituksen alaisena. [24] Kaava (23) esittää kaarevuuden muutokset siirtymien avulla:

$$\begin{aligned}\kappa_\phi &= \frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{u}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right), \\ \kappa_\theta &= \left(\frac{u}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \frac{\cot\phi}{r_2}.\end{aligned}\tag{23}$$

Sijoittamalla muodonmuutokset (6) ja kaarevuuden muutokset (23) yhtälöryhmän (20) neljään ensimmäiseen kaavaan voidaan voimasuureet N_ϕ , N_θ , M_ϕ ja M_θ esittää siirtymien avulla (kts. yhtälöryhmä 24). [11]. Kaavoissa (20) esiintyvät koordinaatit x ja y voidaan esittää merkein ϕ ja θ .

$$\begin{aligned}N_\phi &= \frac{Et}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_1} \left(\frac{du}{d\phi} + w \right) + \frac{\nu}{r_2} (u \cot\phi + w) \right), \\ N_\theta &= \frac{Et}{1-\nu^2} \left(\left(\frac{\nu}{r_2} (u \cot\phi + w) + \frac{1}{r_1} \left(\frac{du}{d\phi} + w \right) \right) \right), \\ M_\phi &= -D \left[\frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) + \frac{v}{r_2} \left(\frac{v}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \right], \\ M_\theta &= -D \left[\left(\frac{v}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \frac{\cot\phi}{r_2} + \frac{v}{r_2} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v}{r_1} - \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \right].\end{aligned}\tag{24}$$

Sijoittamalla yhtälöryhmän (24) voimasuureet yhtälöryhmään (21) saadaan kolme yhtälöä ja kolme tuntematonta: siirtymät u, w ja leikkausvoima Q_ϕ . Mikäli halutaan kahden muuttujan (u, w) funktioita, leikkausvoima voidaan eliminoida pois yhtälöryhmästä (21). Yleensä näitä siirtymien suhteen johdettuja yhtälöitä käytetään kuorirakenteissa taivutustilassa. [24]

3.2.4 Sylinterimäiset säiliöt

Useiden sylinterimäisten säiliöiden mitoituksessa voidaan käyttää menetelmiä, jotka esitettiin edellä. Sylinterimäisiin säiliöihin voidaan luokitella juurestaan jäykästi tai vapaasti kiinnitetyt säiliöt, maassa makaava levy, elastisen katon tai alustan omaava säiliö, monesta eri paksuisista levyistä rakennettu säiliö. [24]

Sylinterimäisten säiliöiden käyttäytymistä voidaan kuvata säteen suuntaisen siirtymän w ja käyristymisen dw/dx avulla missä tahansa säiliön pisteessä. Koska funktioiden w ja dw/dx on oltava jatkuvia x :n suunnassa, niin siirtymät ja käyristymät elementin reunassa ovat samat kuin paikalliset vapausasteiden siirtymät

reunoilla. [8]

Piiput, siilot, kattilat ja muut astiat, jotka ovat paineen alaisena sisäpuolelta ovat yksinkertaisia esimerkkejä pyörähdysymmetrisesti kuormitetuista kuorielementeistä. Symmetrian takia sylinterimäiseen säiliöön vaikuttaa sisäiset voimasuureet N_θ , M_θ , N_ϕ ja Q_ϕ (kuva 14). [17]

3.2.4.1 Neljännen kertaluvun differentiaaliyhtälö

Pyörähdysymmetrisesti kuormitetun sylinterimäisen kuoren säteensuuntaiselle siirtymälle w voidaan johtaa neljännen kertaluvun differentiaaliyhtälö lähtemällä pyörähdyskuoren tasapainoyhteälöiden yleisestä muodosta merkitsemällä niissä $r_1 d\pi = dx$, $\phi = \pi/2$ ja $r = r_2 = a$. Vaihtamalla alaindeksi ϕ alaindeksiin x ja merkitsemällä $r_r \rightarrow \infty$ voimakomponenttien tasapainoyhtälöistä 21 saadaan: [11]

$$\begin{aligned} \frac{dN_x}{dx} + p_x &= 0, \\ \frac{N_\theta}{a} + \frac{dQ_x}{dx} - p_r &= 0, \\ \frac{M_x}{dx} - Q_x &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Eliminoimalla yhtälöistä (25) kahdesta viimeisestä Q_x , saadaan tasapainoyhtälö [11]

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{N_\theta}{a} - p_r = 0. \quad (26)$$

Tässä yhtälössä taivutusmomentti M_x ja normaalivoima N_θ voidaan lausua siirtymän avulla. Kaavasta 6 voidaan nähdä, että kiertymiskulma yksinkertaistuu muotoon $\chi = -\frac{dw}{dx}$ ja kaavat 24 lieriökuorelle ovat: [11]

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{Et}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dx} + \nu \frac{w}{a} \right), \\ N_\theta &= \frac{Et}{1-\nu^2} \left(\frac{w}{a} + \nu \frac{du}{dx} \right), \\ M_x &= -D \frac{\chi}{dx} = D \frac{d^2 w}{dx^2}, \\ M_\theta &= \nu M_x. \end{aligned} \quad (27)$$

Eliminoimalla du/dx voimien N_x ja N_θ lausekkeista saadaan:

$$N_\theta = \nu N_x + \frac{Et}{a} w. \quad (28)$$

Sijoittamalla yllä olevasta kaavasta saatu N_θ ja yhtälöryhmässä (27) esiintyvä M_x kaavaan (26) saadaan haettu lieriön säteensuuntaisen siirtymän w neljännen kertaluvun differentiaaliyhtälö:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Et}{a^2} w = p_r - \frac{\nu}{a} N_x. \quad (29)$$

Kaava (29) voidaan esittää muodossa, jossa w :n kertoimeksi saadaan yksikötön luku kertomalla yhtälö (29) a^2/Et :lla, jolloin differentiaaliyhtälö voidaan esittää muodossa:

$$\frac{Da^2}{Et} \frac{d^4 w}{dx^4} + w = \frac{a^2}{Et} (p_r - \frac{\nu}{a} N_x). \quad (30)$$

Differentiaaliyhtälön ratkaisu w on homogeenisen yhtälön ratkaisun w_0 ja yksityisratkaisun w_1 summa. Yksityisratkaisu on differentiaaliyhtälön 30 vasemman puoleinen osa.

Lieriön yleisen differentiaaliyhtälön 29 yksityisratkaisu w_1 on sama kuin kalvo-tilan ratkaisu w mikäli differentiaaliyhtälö on korkeintaan kolmatta astetta x :n suhteen. Tällöin $\frac{Da^2}{Et} \frac{d^4 w}{dx^4}$ saa arvon nolla ja differentiaaliyhtälön kaava yksinkertaistuu muotoon: [11]

$$w = \frac{a^2}{Et} (p_r - \frac{\nu}{a} N_x). \quad (31)$$

Taivutustilan homogeeninen yhtälö w_0 , joka on yhtälön 30 oikeapuoleinen osa, voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = 0, \quad (32)$$

missä $4\beta^4 = Et/Da^2$ ja sen ratkaisu on:

$$w_0 = e^{-\beta x} (A_1 \cos \beta x + A_2 \sin \beta x) + e^{\beta x} (B_1 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x). \quad (33)$$

Sylinterimäiset kuoret jaetaan kahteen osaan: pitkiin ja lyhyihin. Pitkässä sylinterissä reunahäiriötä omaavan reunan etäisyys putken keskelle on vähintään $2\pi/\beta$.

Pitkissä sylintereissä jokainen reuna tarkastetaan erikseen, mutta lyhyissä sylintereissä toisen reunan reunahäiriön vaikutus ulottuu toisen reunahäiriön alueelle. Koska sylinteri on pyörähdysymmetrinen kuorirakenne ja pitkissä sylintereissä oletetaan, että $x \rightarrow \infty$, niin homogeenisen funktion 33 ratkaisu pitkissä sylintereissä supistuu muotoon: [24]

$$w_0 = e^{-\beta x}(A_1 \cos \beta x + A_2 \sin \beta x). \quad (34)$$

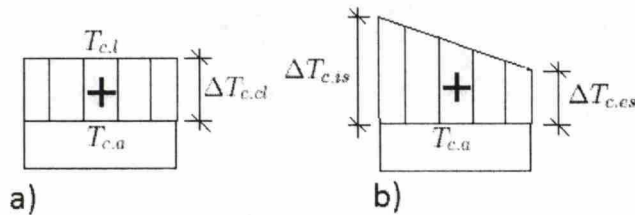
Kun homogeenisen ratkaisun 33 integrointivakiot on määritetty reunaehtojen avulla, koko ratkaisuun $w = w_0 + w_1$ liittyvät voimasuureet lasketaan kaavoista:

$$\begin{aligned} N_\theta &= \nu N_x + \frac{Et}{a} w, \\ M_x &= D \frac{d^2 w}{dx^2}, \\ Q_x &= \frac{dM_x}{dx} = D \frac{d^3 w}{dx^3}, \\ M_\theta &= \nu M_x. \end{aligned} \quad (35)$$

3.3 Lämpötilan vaikutus sylinterimäisessä säiliössä

Lämpökuorma vaikuttaa sylinterimäisiin rakenteisiin kahdella eri tavalla: [2]

- Rakenteen lämpötila muuttuu kauttaaltaan $\Delta T_{c.cl}$:n verran tasaisesti (tasainen lämpötilan muutos) tai
- rakenteeseen aiheutuu lämpögradientti (lämpötilaero pintojen välillä) säilytettävän materiaalin korkean lämpötilan ansiosta niin, että rakenteen lämpötila nousee sisäpinnassa $\Delta T_{c.is}$ ja ulkopinnassa $\Delta T_{c.es}$. Lämpöjakauma oletetaan lineaariseksi seinämän yli säteen suunnassa (kts. kuva 16).



Kuva 16: Lämpökuormat: a) lämpötila muuttuu rakenteessa tasaisesti (tasainen lämpötilan muutos) b) lämpögradientti ja lämpötilan muutos.

Lämpögradientti on tärkein lämpökuorma. Se aiheutuu säilytettävän materiaalin korkeasta lämpötilasta verrattuna seinämän ulkopinnan lämpötilaan. Lämpögra-

dientista rakenteeseen aiheutuvat jännitykset voivat aiheuttaa rakenteellisia vaurioita, joten sitä ei saa laiminlyödä. Päivittäinen ja myös kausittainen lämpötilan muutos, joka saa rakenteen laajenemaan ja supistumaan, saattaa aiheuttaa rakenteisiin rasituksia ja tästä johtuen myös halkeamia. Päivittäinen lämpötilanmuutos, mikä voi aiheutua ulkoilman lämpötilan muutoksesta olipa se auringon valosta tai pakkasvaihtelusta, jätetään usein huomiotta.[20]

Lämpötilan noustessa säiliön seinämä laajenee ja säiliön halkaisija kasvaa. Tällöin säilytettävä materiaali laskeutuu täyttämään tyhjentyneet tilat. Vastaavasti seinämän lämpötilan laskiessa, seinämään aiheutuu passiivinen paine, koska seinämän liikkuminen on säilytettävään tavaraan päin. Voimasuureen lisäys passiivisesta paineesta voi olla suuri varsinkin kehän suuntaisessa normaalivoimassa. [20]

Siilon pinnan äkkinäinen lämpötilan muutos voi aiheuttaa tilapäisen ja epälineaarisen lämpötilajakauman, josta seuraa paikallinen lämpögradientti. Tämä ilmiö aiheuttaa jännityksiä pinnan läheisyydessä ja voi johtaa pinnan lohkeiluun. Syntyvät voimasuureet ovat kuitenkin paljon pienempiä kuin stationaarisessa tilassa. [8]

Jotta lämpökuormasta aiheutuvia jännityksiä voidaan seurata, on ensin selvítettävä rakenteen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötilat. Säiliörakenteiden mitoituksessa lämpötilakuormituksia vastaan on tehtävä seuraavat oletukset: [20]

1. Betonilla ei ole vetolujuutta, ainoastaan puristuslujuus.
2. Lämpötila muuttuu vain säteen suunnassa.

Rakenteen omasta painosta aiheutuva puristusjännitys yleensä kumoaa lämpötilasta aiheutuvat pystysuuntaiset jännitykset. Tästä tyystä ei pystysuuntaista raudoitusta tarvita ottamaan lämpöjännityksiä vastaan.[20] Säiliörakenteissa ja siiloissa, pystysuuntaista laajenemista ei ole yleensä estetty eikä pystysuuntaisia voimia siten synny kummassakaan lämpökuormatapauksessa (a) ja (b) [2].

3.3.1 Tasainen lämpötilan muutos

Homogeenisissa ja isotrooppisissa materiaaleissa tasaisesta lämpötilan muutoksesta $\Delta T_{c,l} = T_{c,l} - T_{c,a}$ aiheutuu tasainen ja lineaarinen muodonmuutos kaikissa suunnissa

$$\epsilon_t = \alpha_c \Delta T_{c,l} \quad (36)$$

missä α_c on kokeellisesti määritelty materiaalin lämpölaajenemiskerroin [$1/^\circ C$], $T_{c,l}$ on lopullinen lämpötila ja $T_{c,a}$ on alkulämpötila. Isotrooppisissa materiaaleissa lämpötilan muutoksesta ei aiheudu leikkausjännityksiä, näin ollen liukuma $\gamma_t = 0$. [24]

Tapauksessa, jossa siilo on tasaisesti jakautuneen lämpötilan muutoksen alaisena ja reunojen siirtymät ovat vapaat kaikissa suunnissa (vapaasti tuettu), ei minkälaisia

voimasuureita rakenteeseen synny. Tällöin kiertymät ovat nollija ja rakenne laajenee kaikissa suunnissa. Laajenema säteen r suunnassa on

$$\delta = \alpha_c r \Delta T_{c.cl}. \quad (37)$$

Mutta taas tapauksessa, jossa säiliö on jäykästi kiinnitetty siten että reunojen laajeneminen ja kiertyminen tuilla on rajoitettu, rakenteeseen syntyy sekä taivutusmomentteja että normaalivoimia reunahäiriöalueelle. [2]

Kirhoffin levyteoriaan muokatun Hooken lain avulla saadaan kaava, jossa muodon muutos on esitetty ulkoisista kuormista aiheutuvien jännitysten ja lämpökuormasta aiheutuvan muodonmuutoksen funktiona:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) + \alpha_c \Delta T_{c.cl}, \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \alpha_c \Delta T_{c.cl}. \end{aligned} \quad (38)$$

Hooken lain avulla saadaan yhteys kehänsuuntaisen normaalivoiman ja mekaanisista kuormista ja lämpökuormasta aiheutuvan kokonaismuodonmuutoksen välille seuraavasti: [8]

$$N_\theta = Et\left(\frac{w}{r} + \alpha_c \Delta T_{c.cl}\right), \quad (39)$$

missä w on kokonaissiirtymä säteen suunnassa.

Tasapainolauseke kehän suuntaisen normaalivoiman ja säteensuuntaisen voimien välille voidaan kirjoittaa muotoon (kts. kaava 25):

$$N_\theta = r\left(p_r + \frac{dQ_x}{dx}\right), \quad (40)$$

missä $Q_x = -Dd^3w/dx^3$. [8]

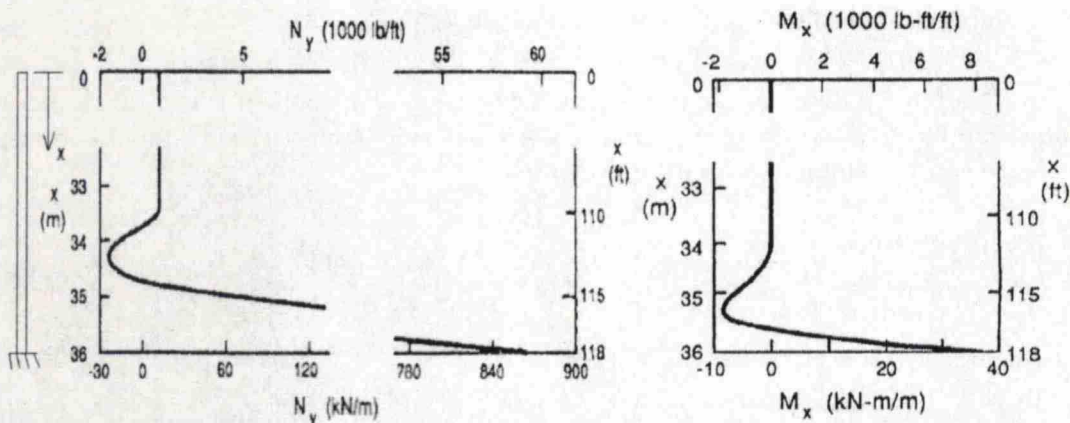
Tapauksessa, jossa rakenteeseen vaikuttaa ainoastaan lämpökuorma p_r voidaan jättää pois. Eliminoimalla kaavoista 39 ja 40 normaalivoiman N_θ voidaan johtaa differentiaaliyhtälön muotoon:

$$\frac{d^4w}{dx^4} + 4\beta^4 w + \frac{tE\alpha\Delta T_{c.cl}}{rD} = 0, \quad (41)$$

jonka yleinen ratkaisu on

$$w = w_0 - \frac{lE\alpha\Delta T_{c.cl}}{rD4\beta^4}, \quad (42)$$

missä w_0 on homogeeninen ratkaisu yhtälön 34 mukaisesti. [8] Kuvassa 17 on esitetty normaalivoiman ja taivutusmomentin jakauma juurestaan jäykästi kiinnitetyssä ja yläpäästään vapaana olevassa lieriössä tasaisesta lämpötilan muutoksesta. Kuvasta 17 nähdään juuren läheisyyteen syntyvän reunahäiriön, koska lieriön siirtymä säteen suunnassa on rajoitettu juuressa.



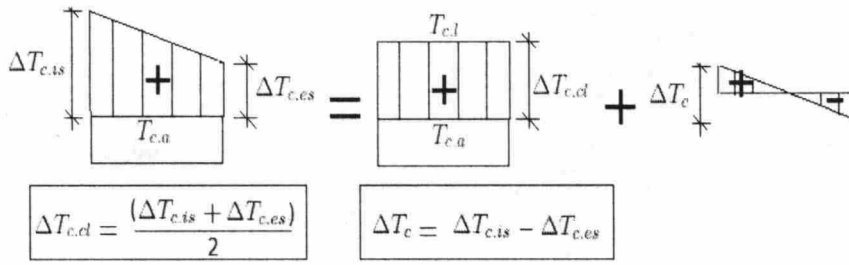
Kuva 17: Kehänsuuntaisen normaalivoiman ja taivutusmomentin jakauma tasaisesta lämpötilan muutoksesta juurestaan jäykästi kiinnitetyssä ja yläpäästään vapaassa lieriössä. [8]

3.3.2 Lämpögradientti

Kappaleessa 3.3 mainitussa lämpökuormatapauksessa (b), jossa lämpötila oletetaan nousevan sisäpinnassa $\Delta T_{c,si}$ ja ulkopinnassa $\Delta T_{c,se}$, lämpötilan muutos voidaan jakaa kahteen osaan: (kts. kuva 18) [2]

- (b1) Tasainen lämpötilan muutos rakenteessa $\Delta T_{c,cl} = (\Delta T_{c,si} + \Delta T_{c,se})/2$, joka voidaan käsitellä samalla tavalla kuin tapauksessa (a) ja
- (b2) puhdas lämpötilagradientti sisäpinnassa $(\Delta T_{c,si} - \Delta T_{c,se})/2$ ja ulkopinnassa $-(\Delta T_{c,si} - \Delta T_{c,se})/2$ rakenteen keskilinjan lämpötilan ollessa sama kuin alkulämpötila.

Kuvassa 18 on esitetty lämpökuormatapauksen b jaottelu tasaiseen lämpötilan muutokseen (b1) ja puhtaaseen lämpögradienttiin (b2).



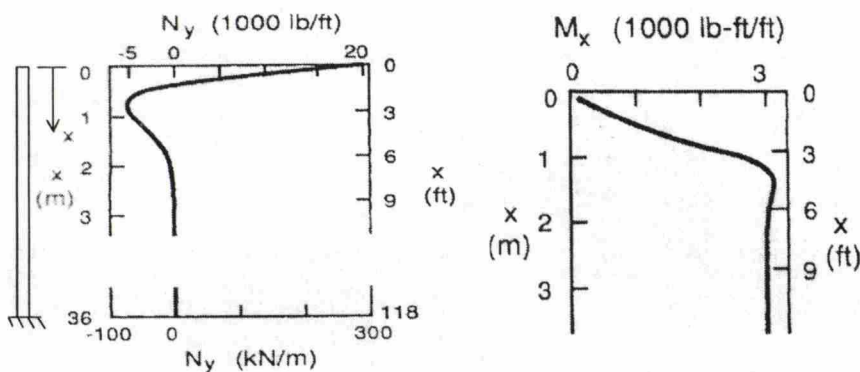
Kuva 18: Lämpökuormatapauksen b jaottelu tasaiseen lämpötilan muutokseen (b1) ja puhtaaseen lämpögradienttiin (b2).

Puhtaan lämpögradientin tapauksessa rakenteeseen vaikuttaa pysty- ja kehänsuuntaisia taivutusmomenteja. Säiliön rakenteen paksuuden ollessa vakio jäykästi tuetuissa reunoissa ja riittävän kaukana vapaasta reunasta taivutusmomentit ovat vakiot. (kts. kuva 19). Taivutusmomentin suuruus on riippuvainen lämpögradientin suuruudesta ja rakenteen paksuudesta. Lämpögradientista aiheutuvat taivutusmomentit ovat: [2]

$$M_x = M_\theta = \frac{E\alpha_c(\Delta T_{c,si} - \Delta T_{c,se})t^2}{12(1 - \nu)}. \quad (43)$$

Mikäli $\Delta T_{c,si} > \Delta T_{c,se}$, kaavan 43 taivutusmomentit aiheuttavat vetojännityksiä ulkopinnassa ja puristusjännityksiä sisäpinnassa. Jäykästi kiinnitetyssä päässä ja alueissa, jossa käyritymä on estetty (kiertymä on nolla), säteen suuntainen siirtymä ja normaalivoima ovat nollia. [2]

Kuvassa 19 on esitetty lämpögradientista rakenteeseen aiheutuvat kehän suuntainen normaalivoima ja taivutusmomentti juurestaan jäykästi kiinnitetyssä ja yläpäästään vapaassa lieriössä.



Kuva 19: Kehänsuuntaisen normaalivoiman ja taivutusmomentin jakauma lämpögradientista juurestaan jäykästi kiinnitetyssä ja yläpäästään vapaassa lieriössä. [8]

Puhdas lämpögradientti ei aiheuta kehänsuuntaista muodonmuutosta rakenteseen. Sen sijaan siitä aiheutuu käyristymää osissa, joissa käyristymä saa tapahtua, esimerkiksi vapaan pään ympäristössä. Kehänsuuntainen normaalivoima on vain seinämän siirtymän funktio kuten kaavasta 39 käy ilmi. Puhtaan lämpögradientin tapauksessa tasainen lämpötilan muutos $\Delta T_{c,cl}$ on nolla (kts. kuva 18). Joten differentiaaliyhtälö saa muodon: [8]

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = 0. \quad (44)$$

Kuvasta 19 nähdään, että kehän suuntainen normaalivoima on nolla suuressa osassa rakennetta, koska puhdas lämpögradientti ei aiheuta siirtymiä seinämässä. Normaalivoima yläreunan läheisyydessä aiheutuu lämpögradientin aiheuttamasta käyristymästä ja koska käyristyminen on mahdollista taivutusmomentti lähestyy vastaavasti nollaa. Yläreunasta etäännyttäessä käyristymän muutoksen ehkäisee seinämän taivutusjäykkyys ja momentti aiheutuu enää pelkästään lämpögradientista. [8]

3.3.2.1 Lämpögradientti muuttuvassa seinämässä

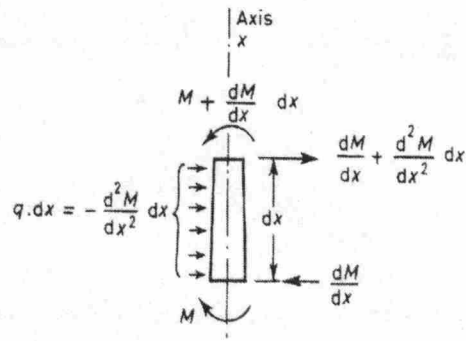
Käyristymän ollessa estetty puhtaalla lämpögradientilla kuormitettua paksuudeltaan muuttuvaa seinämää rasittaa muuttuva taivutusmomentti. Taivutusmomentti on verrannollinen lämpögradientin suuruuteen sekä seinämän paksuuden funktion toisen asteen derivaattaan (kts. kaava 43). Muuttuvasta taivutusmomentista aiheutuu siirtymä, joka voidaan esittää seinämän normaalisuuntaan vaikuttavan painekuorman avulla. Painekuorma voidaan esittää taivutusmomentin avulla: [2]

$$q_T = -\frac{d^2 M}{dx^2}. \quad (45)$$

Sijoittamalla kaava 43 yllä olevaan kaavaan, painekuormaksi saadaan

$$q_T = -\frac{E\alpha_c(T_{c,si} - T_{c,se})d^2(t^2)}{12(1-\nu)dx^2}. \quad (46)$$

Kuvassa 20 on puhtaasta lämpögradientista aiheutuva taivutusmomentti esitetty painekuormana paksuudeltaan muuttuvassa seinämässä. Kuva on osa pitkästä sylinterimäisestä seinärakenteesta puhtaan lämpögradientin alaisena.



Kuva 20: Lämpögradientista aiheutuva taivutusmomentti ilmaistuna painekuormalla paksuudeltaan muuttuvassa sylinteriseinämassä.[2]

4 LASKENNALLISEN TARKASTELUN PERUSTEET

Laskennallisessa tarkastelussa tutkittiin reaktoritornin vartta, alasäiliötä ja niiden välistä liitosta. Vartta tarkasteltiin juurestaan vapaasti ja jäykästi tuettuna stationäärisessä ja epästationäärisessä tilassa. Reaktoritornin varsien keskinäinen kaavailtu etäisyys toisistaan on 25 metriä, joten alasäiliön rakenneratkaisut optimoitiin kaukana liitoksesta ilman liitoksen reunahäiriötä. Alasäiliön ja varren välistä liitosta ja sen vahvistamista tutkittiin optimoitua vartta ja alasäiliötä käyttäen.

Hydrostaattinen paine ja lämpökuorma olivat mukana kaikissa tarkasteluissa. Korkean reaktoritornin vuoksi hydrostaattinen paine on suuri. Lietteen korkea lämpötila (+104°C) reaktoritornin sisällä altistaa rakenteet suurelle lämpökuormalle.

Rakenteet tutkittiin sekä talvi- että kesäolosuhteessa. Ulkoilman lämpötilaksi oletettiin talvella -20°C ja kesällä +20°C. Oletettiin, että betoni valetaan +20°C:n lämpötilassa. Sisätilan ja rakenteen sisäpinnan väliselle lämmönsiirtokertoimelle käytettiin arvoa 2407 W/m²K sekä ulkoilman ja rakenteen ulkopinnan välisenä lämmönsiirtokertoimena käytettiin arvoa 16.3 W/m²K [1]. Lämmönsiirto- ja lujuusanalyyseissä käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Laskennallisessa tarkastelussa käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Materiaaliominaisuus	Arvo
Betoni C35/45 (SFS-EN 1992-1-1 2005)	Kimmokerroin	34 GPa
	Lämmönjohtavuus	1.5 W/(mK)
	Lämpölaajenemiskerroin	10 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Ominaislämpökapasiteetti	960 J/(kg · °C)
	Poissonin vakio	0.2
	Tiheys	2500 kg/m ³
Teräs (EN 1993-1-1)	E-moduuli	210 GPa
Lujitemuovi	Lämmönjohtavuus	0.3 W/(mK)
Mineraalivilla	Lämmönjohtavuus	0.04 W/(mK)
Polyuretaani	Lämmönjohtavuus	0.02 W/(mK)
Maaperä	Lämmönjohtavuus	1.2 W/(mK)
Routaeriste	lämmönjohtavuus	0.04 W/(mK)

4.1 Säiliörakenteen kuormat

Tornimaiseen säiliörakenteeseen voivat vaikuttaa seuraavat kuormat: [23]

- säilytettävän nesteen aiheuttama hydrostaattinen paine,
- nestepinnan yläpuolella vaikuttava ali- tai ylipaine,

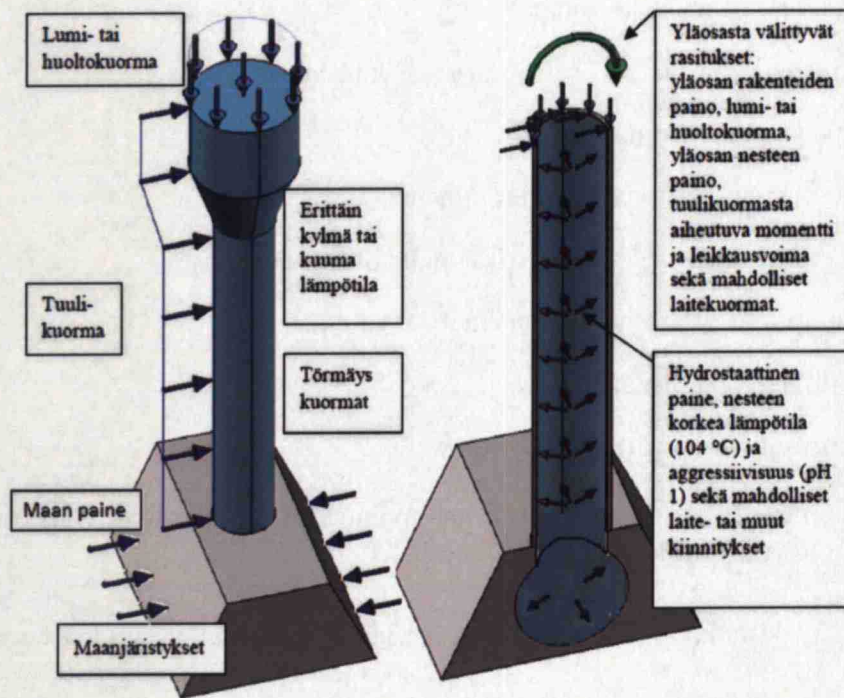
- rakenteen pysyvät kuormat,
- jakautuneet ja pistemäiset muuttuvat kuormat,
- lumi- ja tuulikuorma,
- perustusten epätasainen painuminen,
- liittyvistä rakenteista aiheutuvat paikalliset kuormat,
- lämpötilaeroista johtuvat kuormat,
- maanjäristyskuormat ja
- onnettomuus- ja törmäyskuormat.

Edellä mainittujen kuormien lisäksi maanpaine rasittaa alasäiliörakennetta, mikäli se on joko osittain tai kokonaan maan alla.

Tässä tutkimuksessa on huomioitu seuraavat kuormat ja näiden kuormitusyhdistelmät:

- säilytettävän nesteen aiheuttama hydrostaattinen paine,
- rakenteen pysyvät kuormat,
- lumi- ja tuulikuorma,
- lämpötilaeroista johtuvat kuormat ja
- maanpaine.

Kuvassa 21 on esitetty reaktoritornia kuormittavat ulkopuoliset ja sisäpuoliset rasitukset. Tutkimuksessa ei ole huomioitu maanjäristyksestä, törmäyskuormasta tai mahdollisista kiinnityksistä aiheutuvia kuormia. Laskelmissa käytettiin tasaisesti jakautunutta lumi- tai hyötykuormana 1.2 kN/m^2 . Reaktorin sisäpuolisen lietteen tiheydelle käytettiin arvoa 1500 kg/m^3 . Reaktorin lietteen ja seinämän välinen kitka oletettiin merkitsettömäksi, joten lietteestä ei aiheudu pystysuuntaista kuormaa seinämälle. Tuulikuorma on määritetty alustavassa tutkimuksessa liitteen 1 mukaisesti [15].



Kuva 21: Vasemman puoleinen kuva: reaktoritornin ulkopuoliset rasitukset. Oikean puoleinen kuva: reaktoritornin sisäpuoliset ja tornin yläsäiliöstä varsian välittyvät rasitukset. [15]

4.2 Hydrostaattinen paine

Hydrostaattinen paine on nesteen tai kaasun oman painovoiman aiheuttama paine. Hydrostaattinen paine lasketaan kaavasta:

$$p = \rho gh, \quad (47)$$

missä

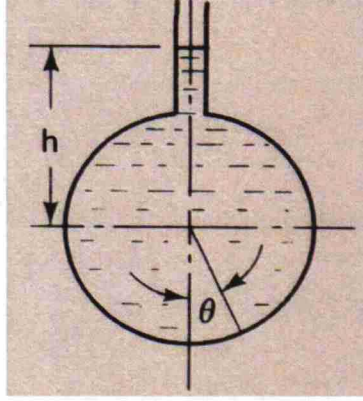
- ρ on väliaineen tiheys [kg/m^3],
- g on maan vetovoiman kiihtyvyys [m/s^2] ja
- h on neste- tai kaasukerroksen korkeus [m].

Kuten kaavasta (47) nähdään, hydrostaattisen paineen suuruuteen vaikuttaa ainoastaan väliaineen tiheys ja korkeus. Hydrostaattinen paine säiliössä on sama suuruinen kaikkiin suuntiin samalla korkeudella ilman säiliörakenteen muodon vaikutusta.

Toisin kuin reaktoritornin varsi, alasäiliö ei ole pyörähdyssymmetrinen. Nesteen vapaan pinnan ollessa alasäiliön yläpinnan yläpuolella hydrostaattinen paine laske-
taan kaavasta (48),

$$p_r = -\rho(h - a\cos\alpha), \quad (48)$$

missä h on nesteen tason korkeus $[m]$ säiliön keskipisteestä ja a on säiliön säde $[m]$. Kuvassa 22 on esitetty kaavaa 48 havainnollistava nesteen tason korkeus.



Kuva 22: Nesteen taso alasäiliössä. [24]

4.3 Lämpökuorma

Lämpökuorma on lämmönsiirto rakenteeseen aiheutuva tasainen lämpötila tai lämpögradientti tai näiden kahden yhdistelmä. Lämmönsiirto voi tapahtua kolmella eri tavalla: konduktio (johtuminen), konvektio ja säteily. Kaikkissa edellä mainituissa lämmönsiirtotavoissa tarvitaan lämpötilaero. Lämmönsiirto tapahtuu korkeammasta matalampaan lämpötilaan. [26] Tässä yhteydessä lämmönsiirron oletettiin tapahtuvan ainoastaan konduktiolla.

Sylinterimäisissä putkissa merkittävä lämpövirran kulku tapahtuu seinämän normaalisuunnassa eli seinämää vastaan kohtisuorassa suunnassa eikä muissa suunnissa tapahtuvaa lämpöhäviötä tarvitse ottaa huomioon pienen määrän vuoksi [26]. Tämän takia pyörähdyssymmetrisessä varressa konduktiivista lämmönsiirtoa tutkittiin yksidimensioisena. Rakennekerrosten lämpötilajakauma stationäärisessä tilassa laskettiin käsin ja laskennasta saadut betonikerroksen lämpötila- jakauma käytettiin lämpökuormana. Epästationäärisessä tilassa betonikerroksen pintojen lämpötiloja tarkasteltiin Abaqus-ohjelmalla.

Tapauksissa, joissa rakenne tai sen reunaehdot eivät olleet pyörähdyssymmetrisiä lämmönsiirto ei ole yksidimensioista. Näissä rapauksissa rakenteen konduktiivista lämmönsiirtoa tutkittiin Abaqus-ohjelmalla. Alasäiliö on putkimainen rakenne, jonka poikkileikkaus ja reunaehdot eivät ole pyörähdyssymmetrisiä. Tästä syystä alasäiliön lämmönsiirto on 2-dimensioiden kaukana liitoksesta. Koska kahta eri rakennetta oli liitetty toisiinsa kohtisuoraan toisiaan vastaan lämmönsiirto on 3-dimen-

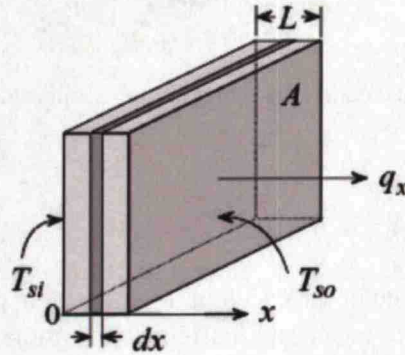
sioinen alasäiliön ja varren liitoksessa. Alasäiliön ja liitoksen lämmönsiirron tarkastelussa saatu betonikerroksen lämpötilajakauma käytettiin lämpökuormana lujuusanalyysissa.

4.3.1 Konduktio pyörähdyssymmetrisessä putkessa

Yksidimensioisessa konduktiossa seinämän läpi kulkeva lämpövirta voidaan esittää yleisesti kaavalla

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx}, \quad (49)$$

missä q_x on lämpövirta [W/m^2], A on seinämän pinta-ala [m^2], k on lämmönjohtavuuskerroin ja lämpötilaero $dT = T(x + dx) - T(x)$. [21] Kuvassa 23 on esitetty yksidimensioisen seinän läpi kulkeva lämpövirta.



Kuva 23: Yksidimensioisen seinän läpi kulkeva lämpövirta. [14]

Lämpötilojen ollessa vakioita sisä- ja ulkopuolella lämmönsiirto on yksidimensioinen ja stationäärinen ts. ajasta riippumaton. Näin sylinterin seinämän lämpötilajakauma on vain riippuvainen säteen suunnasta, joten se voidaan ilmaista muodossa $T_c = T_c(r)$. [26]

Stationäärisessä tilassa seinämän läpi kulkeva lämpömäärä on vakio. Tämä johtuu siitä, että seinämän lämpötilajakauma on ajasta riippumaton ja seinämään siirtyvän lämpömmäärän on oltava yhtä suuri kuin seinämästä ulos siirtyvän. [26]

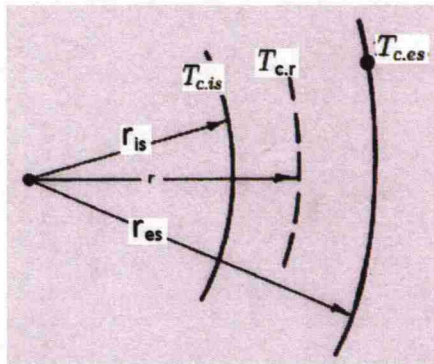
Kuvassa 24 on esitetty yksikerroksinen sylinterimäinen seinämä, missä r_{is} , r_{es} ja r ovat sisäpinnan, ulkopinnan ja tarkastelupisteen säteet, vastaavasti $T_{c,is}$, $T_{c,es}$ ja $T_{c,r}$ ovat edellä mainittujen säteiden kohdalla vallitsevia lämpötiloja. Seinämän keskimääräinen lämmönjohtavuus on k ja sylinterin paksuus L . Tämän seinämän läpi kulkeva lämpövirta voidaan laskea kaavaa (49) hyväksi käyttäen seuraavasti

$$\frac{q_r}{2\pi r L} = -k \frac{dT_c}{dr}, \quad (50)$$

missä q_r on seinämän läpi kulkeva lämpövirta aikayksikössä. Integroimalla yllä oleva kaava, saadaan lämpövirralle

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{c.is} - T_{c.es})}{\ln(r_{es}/r_{is})}, \quad (51)$$

missä q_r :n merkki kuvaa lämpövirran kulkusuunnan. Lämpövirran positiivinen merkki tarkoittaa, että lämpövirta on sisältä ulospäin ja vastaavasti miinusmerkki tarkoittaa, että se on ulkoa sisäänpäin. [13]



Kuva 24: Yksikerroksisen seinän läpi johtuva lämpövirta [14]

Kaava (51) voidaan esittää myös muodossa

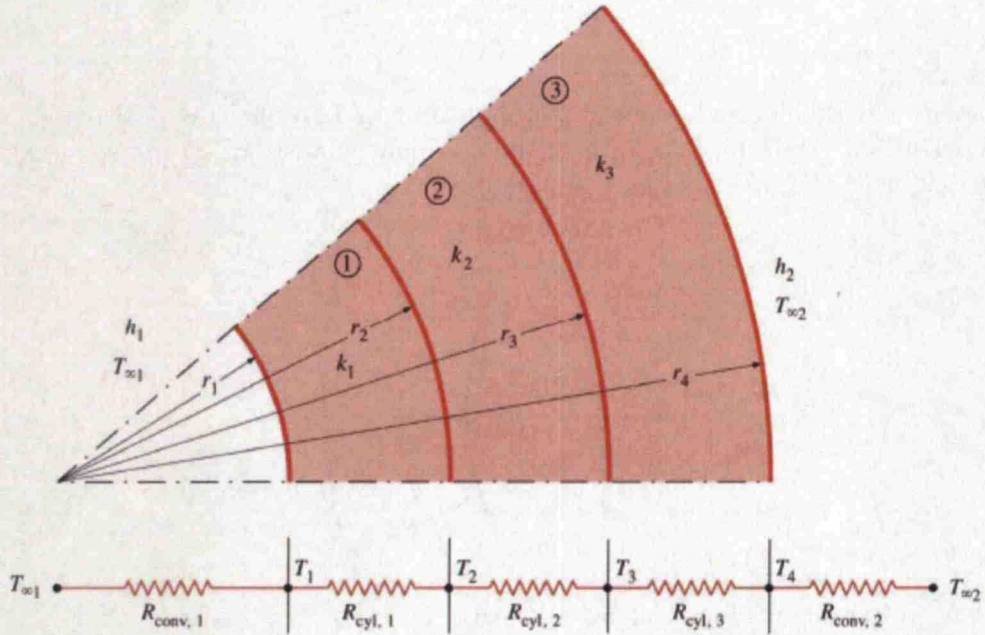
$$q_r = \frac{T_{c.is} - T_{c.es}}{R_{cyl}}, \quad (52)$$

missä R_{cyl} on sylinteriseinämän lämmönvastus, joka on sama kuin $\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk}$.

Yksikerroksisen ja monikerroksisen seinämän läpi kulkevan lämpövirran määrän laskentaperiaate on sama. Seinämän pinnat joutuvat alttiiksi konvektiolle niiden ollessa kosketuksissa nesteen tai kaasun kanssa. Seinämän pinnan lämpötila on pienempi kuin nesteen tai kaasun lämpötila kaukana pinnasta, koska pinnalle syntyy konvektiota vastaan lämmönvastus, joka on kääntäen verrannollinen pintaan kosketuksessa olevan nesteen tai kaasun lämmönsiirtokertoimeen ja pinnan pinta-alaan. Näin lämmönsiirtoa vastustavat rakennekerrosten lisäksi myös seinämän ulko- ja sisäpinnan lämmönvastuksia. Esimerkiksi kolmesta eri materiaalista koostuvan seinämän lämmönvastus lasketaan laavasta: [26]

$$\begin{aligned} R_{total} &= R_{conv,1} + R_{cyl,1} + R_{cyl,2} + R_{cyl,3} + R_{conv,2} \\ &= \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi Lk_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi Lk_3} + \frac{1}{h_2 A_4}, \end{aligned} \quad (53)$$

missä h_1 ja h_2 ovat pintojen lämmönsiirtokertoimet. Kuvassa 25 nähdään kolmesta eri materiaalista koostuvan sylinterimäisen seinämän lämmönvastus.



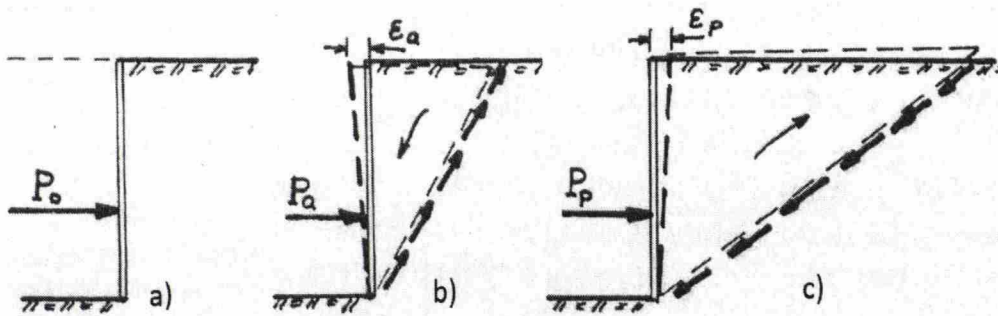
Kuva 25: Lämmönsiirtovastusverkko kolmikerroksisessa lieriöseinässä, kun seinän molemmilla puolilla on konvektiivista lämmönsiirtoa (T_{∞} on ympäristön lämpötila) [26].

4.4 Maanpaine

Maanpaine on se rakenteeseen kohdistuva paine, joka vaikuttaa maan ja rakenteen kosketuskohdassa. Sen suuruus, suunta ja jakautuminen riippuvat maamassan ja rakenteen välisistä liikkeistä ja muodonmuutoksista. Maanpaineella on useita esiintymismuotoja, jotka jaotellaan rakenteen liikkeen ja suunnan perusteella. Näitä ovat: [18]

- lepopaine,
- aktiivinen paine ja
- passiivinen paine.

Tässä diplomityössä maanpaineena käytettiin vain lepopainetta sen yksinkertaisuuden takia. Kuvassa 26 on esitetty erilaisten maanpaineiden muodostumisedellytykset.



HUOM. Piirroksiin on merkitty maanpainevoiman sijasta seinästä maahan kohdistuva vastavoima

Kuva 26: Erilaisten maanpaineiden muodostumisedellytykset a) lepopaine b) aktiivinen maanpaine c) passiivinen maanpaine. [18]

4.4.1 Lepopaine P_o

Lepopaineen edellytyksenä on se, että tukirakenne on täysin jäykkä ja liikkumaton jolloin maan sisäiset jännitusolosuhteet pysyvät muuttumattomina. Lepopaine p_o [N/m^2] voidaan laskea kaavasta [18]

$$\begin{aligned} p_o &= (\gamma z + q)(1 + \sin(\beta))K_o, \\ K_o &= 1 - \sin(\varphi), \end{aligned} \tag{54}$$

missä

z on maanpaineen syvyys [m],

γ on maan tilavuuspaino [N/m^3],

q tasainen pintakuorma maanpinnalla [N/m^2],

K_o lepopaineen maanpaineluku [-],

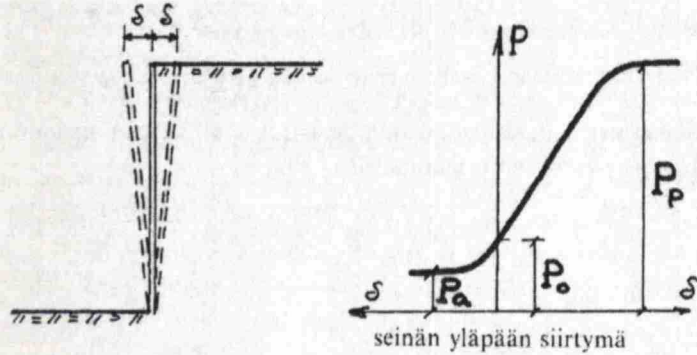
φ maan sisäinen kitkakulma [$^\circ$] ja

β maanpinnan kaltevuuskulma [$^\circ$].

Kokeellisesti tehtyjen mittausten mukaan lepopaineen maanpaineluku K_o on kitkamaassa 0.4...0.6 ja koheesiomaassa 0.5...0.7. [18]

4.4.2 Aktiivinen ja passiivinen maanpaine

Aktiivisen ja passiivisen maanpaineen edellytyksenä on tukirakenteen yläpään siirtymä. Niiden määrittelymenetelmät perustuvat maan murtotilaan, jolloin maan leikkausjännitys ylittää maan leikkauslujuuden. Kuvassa 27 on esitetty aktiivisen ja passiivisen maanpaineen riippuvuus tukirakenteen yläpään siirtymästä. [18]



Kuva 27: Maanpaineen riippuvuus tukirakenteen yläpään siirtymästä. [18]

Aktiivisen maanpaineen syntymiseen riittää seinämän yläpään siirtymä hieman kaivantoonpäin. Yleensä noin 0.2% seinämän korkeudesta riittää aktiivisen maanpaineen kehittymiselle. Aktiivinen maanpaine on yleensä kuin lepopaine, koska tason muotoiseksi otaksutussa murtopinnassa leikkausjännitys on murtohetkellä leikkauslujuuden suuruinen ja vastustaa seinän takana olevan maamassan luisumista alaspäin. [18]

Vastaavasti passiivinen maanpaine edellyttää seinämän yläpään siirtymää maamassaa vasten. Siirtymän on oltava vähintään 2% seinän korkeudesta, jotta passiivinen maanpaine saadaan aikaan. Passiivinen maanpaine on suurin maanpainemuodoista, koska maamassan murtotilanteessa tasomaiseksi otaksutussa murtopinnassa leikkauslujuuden suuruinen leikkausjännitys vastustaa maamassan liikkumista (kts. kuva 26). [18]

Yleisesti käytetyn Rankine'n menetelmän määrittämät kaavat aktiiviselle ja passiiviselle maanpaineelle ovat kitkamaalle

$$\begin{aligned} p_a &= (\gamma z + q) K_a, \\ p_p &= (\gamma z + q) K_p, \end{aligned} \quad (55)$$

koheesiomaalle

$$\begin{aligned} p_a &= \gamma z + q - 2c, \\ p_p &= \gamma z + q + 2c, \end{aligned} \quad (56)$$

ja välimuotomaalle

$$\begin{aligned} p_a &= (\gamma z + q)K_a - 2c\sqrt{K_a}, \\ p_p &= (\gamma z + q)K_p - 2c\sqrt{K_p}, \end{aligned} \quad (57)$$

missä aktiivinen maanpaineneluku $K_a = \tan^2(45^\circ - \beta/2)$, passiivinen maanpaineneluku $K_p = \tan^2(45^\circ + \beta/2)$ ja c on koheesio [N/m^2]. [18]

4.5 Laskentamallit

Reaktoritornin rakenneanalyysi suoritettiin Abaqus-ohjelmalla, joka perustuu elementtimenetelmään. Tehtävän mallinnus, seuranta ja hallinta sekä tulosten tutkinta tehtiin Abaqus/CAE 6.12-1 ohjelmalla ja laskenta-analyysi tehtiin Abaqus/Standard ohjelmalla.

Abaqus on elementtimenetelmään perustuva ohjelmisto, jolla voidaan suorittaa tietokonesimulaatiota, rakenneanalyysiä ja lujuuslaskentaa. Sen suorituskky ulottuu yksinkertaisista lineaarisista analyyseistä haasteellisiin epälineaarisiin simulaatioihin. Sillä voi simuloida tyypillisiä rakennemateriaaleja, joustavia vaahtoja ja geoteknisiä materiaaleja mm. maaperä ja kallio. Rakenneanalyysin lisäksi sen avulla voidaan tarkastella lämmön ja aineen kulkeutumista, akustiikkaa ja maamekaniikkaan liittyviä laskutehtäviä. [5]

Tässä tutkimuksessa on käytetty Abaqus/CAE:ta (Complete Abaqus Environment), joka on interaktiivinen, graafinen käyttöympäristö Abaqukselle. CAE:n avulla voidaan mallintaa analysoitavan mallin geometriaa. Abaqus/CAE on jaettu eri moduuleihin. Näitä moduuleja ovat esimerkiksi, geometrian määrittely, materiaaliominaisuuksien määrittely ja geometrian verkotus. Valmiin mallin laskennallisen analyysin suorittaa Abaqus/Standard, joka on monikäyttöön tarkoitettu tuote. Laskenta-analyysin tuloksia voidaan seurata Abaqus/CAE:n kautta Abaqus/Standardin lähettämien tietojen ansiosta. Abaqus/Standard ratkaisee yhtälöryhmät implisiittisesti jokaisen inkrementin kohdalla. [5]

4.6 Mallinnuksen eteneminen

Rakenteiden mallintamisessa käytettiin kolmea laskentamallia: 3D-malli, aksisymmetrinen malli ja kuorielementtimalli. Tässä diplomityössä tutkittiin kolme erilaista rakennetta: pyörähdysymmetrinen varsi, sisäpinnaltaan ympyrämuotoinen ja ulkopinnaltaan epäpyörähdysymmetrinen alasäiliö sekä alasäiliön ja varren liitos.

Pyörähdysymmetrisen varren tutkimuksessa käytettiin kaikki kolmea laskentamallia. 3D-mallilla tarkasteltiin betonikerroksen ulko- ja sisäpinnan lämpötiloja epästationäärisessä tilassa. Varren betonirakenteeseen aiheutuvia voimasuureita ja

näitä vastaavia jännityksiä laskettiin kuorielementtimallilla, johon mallinnettiin kaikki kohdassa 4.1 mainitut rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Jännevoimista kehän suunnassa aiheutuva jännitys jakauma tarkasteltiin aksisymmetrisellä mallilla. Aksisymmetriseen betonirakenteeseen mallinnettiin tarvittavat jännepunokset, joihin mallinnettiin vetojännityksiä. Vartta tutkittiin juurestaan vapaasti ja jäykästi kiinnitettynä. Kuorielementtimallilla laskettuja voimasuureita, normaalivoima ja taivutusmomentti, käytettiin raudoitusmäärien käsinlaskelmissa. Kuorielementtimallista saadut voimasuureet nimettiin seuraavasti:

SF.SF1 on normaalivoima kehän suunnassa,

SF.SF2 on normaalivoima akselin suunnassa,

SM.SM1 on taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri,

SM.SM2 on taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Alasäiliö, joka tutkittiin erillisenä 15 metrin pituisena rakenteena, oli geometrialtaan epäpyörähdysymmetrinen. Tästä syystä aksisymmetristä mallia ei voitu soveltaa. Kuorielementtimallin käyttäminen olisi myös ollut hyvin epätarkistuksen mukaista seinämän paksuuden muuttuessa, joten mallintamiseen käytettiin 3D-mallia. Alasäiliön tarkastelussa tehtiin kahta analyysityyppiä: lämmönsiirto- ja lujuusanalyysi. Lämmönsiirtoanalyysissä laskettiin alasäiliön rakenteiden lämpötilajakaumaa. Lujuusanalyysissä mallinnettiin vain alasäiliön betonikuorta, johon mallinnettiin hydrostaattista painetta ja lämmön- siirtoanalyysissä saatua betonikuoren lämpötilajakaumaa. Alasäiliön lujuusanalyysissä laskettiin betonirakenteeseen aiheutuvia jännityksiä. 3D-mallista saatujen jännitysten merkinnät olivat seuraavasti:

S.S22 on kehän suuntaan vaikuttava jännitys,

S.S33 on akselin suuntaan vaikuttava jännitys.

Alasäiliö koostui kahdesta osasta ala- ja yläosasta. Yläosa oli tasapaksuinen ja alaspäin aukeava puoliympyrä. Yläosaan sovellettiin aksisymmetristä rakennemallia, johon mallinnettiin jännepunoksia ja jännepunoksiin mallinnettiin jännevoimia. Aksisymmetrisellä mallilla laskettiin kehän suuntaisia jännitysjakaumia.

Koska alasäiliön ja varren välinen liitos oli geometrialtaan monimutkainen se mallinnettiin myös 3D-mallilla. Liitoksen tutkimusta varten mallinnettiin koko reaktoritorni yläsäiliötä lukuun ottamatta. Siihen mallinnettiin kaikki reaktoritorniin kohdistuvat kuormat asettamalla yläsäiliöstä välittyvät kuormat varren yläpäähän. Mallista saatiin jännitys jakaumia.

5 REAKTORITORNIN VARREN TARKASTELU

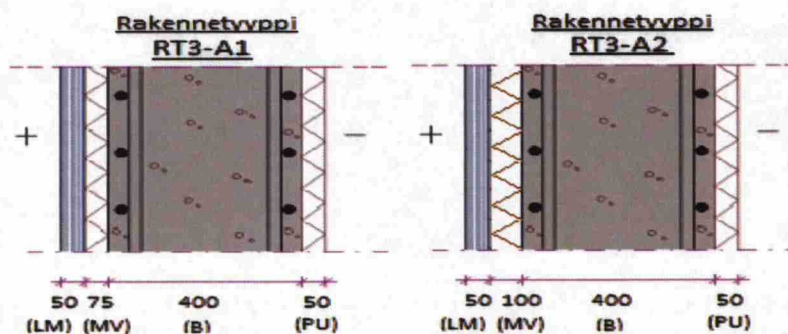
Reaktoritorni koostuu kolmesta osasta: yläsäiliö, varsi ja alasäiliö. Varren keskiosan rakenneratkaisut optimoitiin talviolosuhteissa[1]. Varren reunahäiriöalueen mitoitus ja suunnittelu on haastavampaa kuin varren keskiosan, johon voidaan soveltaa kalvoteoriaa. Juuren reunaehdot vaikuttavat keskeisesti reunahäiriöalueelle aiheutuvien voimasuureiden suuruuteen ja jännitysjakaumaan.

Varsi tukeutuu juurestaan putkimaiseen alasäiliöön, joten sen reunaehdot eivät voi olla pyörähdyssymmetrisiä. Mutta varren reunaehdot saatetaan muuttaa osittain tai täysin jäykiksi jäykistävien rakenteiden avulla. Varsi on suurilta osin reaktoritornia kalvotilassa. Näiden syiden takia vartta tutkittiin yksinkertaistetuissa reunaehdotapauksissa: pyörähdyssymmetrisesti jäykästi tuettuna ja siirtymiä ja kiertymiä sallivana vapaasti tuettuna. Ennen tätä tarkastelua varren keskiosaan optimoidun rakenneratkaisun kelpoisuutta tutkittiin kesäolosuhteita vastaavilla kuormilla.

5.1 Varren rakenneratkaisun tarkastelu

Al-Hellon tutkimuksessa oli keskittyä talviolosuhteisiin [1]. Ulkoilman lämpötila vaikuttaa betonirakenteen lämpötilan jakaumaan. Lämpötilan ollessa alhainen (talvella) betonirakenteeseen aiheutuu suuri lämpögradientti ja suuret lämpöjännitykset. Kesäolosuhteessa ulkoilman lämpötila on korkeampi ja lämpögradientti pienempi, mutta betonirakenteen lämpötilat ovat korkeammat kuin talvella.

Työssä tarkasteltiin Al-Hellon varren keskiosaan optimoidun rakennetyypin RT3-A kelpoisuutta kesäolosuhteisiin. Tämän lisäksi tutkittiin kaksi rakennetyypistä RT3-A edelleen kehitettyä rakennetyyppeä betonikerroksen lämpötilajakauman ja lämpögradientin suhteen. Kuvassa 28 on esitetty nämä rakennetyypit RT3-A1 ja RT3-A2, joissa sisäpuolisen mineraalivillan paksuutta kasvatettiin.



Kuva 28: Rakennetyypit RT3-A1 ja RT3-A2. Kuvassa esitettyjen lyhenteiden selitykset: LM=lujitemuovi, MV=mineraalivilla, B=betoni ja PU=polyuretaani.

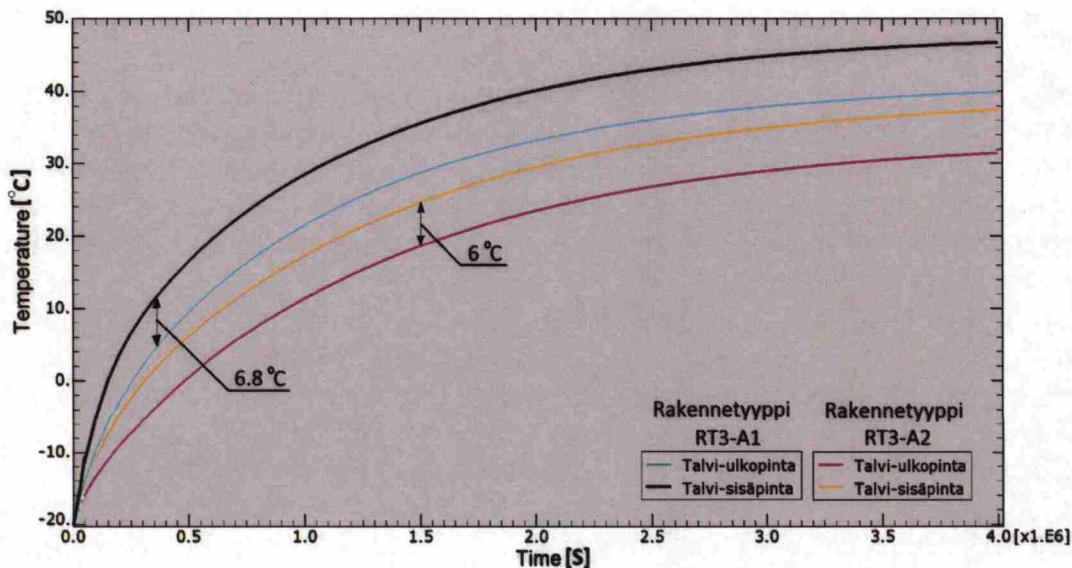
Taulukossa 2 on esitetty edellä mainitun kolmen rakennetyypin rakennepaksuudet, betonikerroksen pintojen lämpötilat, lämpögradientti ja tasainen lämpötilanmuutos kesäolosuhteessa stationäärisessä tilassa. Lämpötilat laskettiin analyttisesti liitteessä 2 esitetyn laskentamallin mukaan. Taulukossa esitetyt lyhenteet ovat: $T_{c.is}$ =sisäpinnan lämpötila, $T_{c.es}$ =ulkopinnan lämpötila, $\Delta T_{c.cl}$ =tasainen lämpötilanmuutos ja ΔT_c =lämpögradientti.

Taulukko 2: Betonikerroksen pintojen lämpötilat ja näistä laskettu tasainen lämpötilan muutos ja lämpögradientti eri rakennetyypeillä kesäolosuhteessa stationäärisessä tilassa.

LÄMPÖTILAJAKAUMAT	$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	ΔT_c [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]
RT3-A (50L-50M-400B-50P)	73.6	68.3	5.3	51.0
RT3-A1 (50L-75M-400B-50P)	66.2	61.6	4.6	43.9
RT3-A2 (50L-100M-400B-50P)	60.5	56.5	4.0	38.5

Taulukosta 2 huomataan, että sisäpinnan lämmöneristeiden paksuntaminen pienentää betonikerroksen pintojen lämpötiloja ja lämpötilaerosta aiheutuva lämpögradienttiä. Betonikerroksen lämpötilat ylittävät betonille suositellun pitkäaikaisen lämpötilan ($\leq 65^\circ\text{C}$) rakennetyypeissä RT3-A ja RT3-A1. Rakennetyypillä RT3-A2 betonikerroksen lämpötila ei ylitä suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa.

Suurin lämpögradientti esiintyy talviolosuhteessa, kun ulkopinnan ja nesteen lämpötilaero on suurimmillaan. Tutkittiin rakennetyyppien RT3-A1 ja RT3-A2 sisä- ja ulkopintojen lämpötilaeroa epästationäärisessä tilassa 3D-mallilla. Reaktoritorni oli alkuhetkellä tyhjä ja sen alkulämpötilaksi oletettiin olevan sama kuin ulkoilman lämpötila (-20°C). Kuvassa 29 on esitetty ajasta riippuvat lämpötilat betonikerroksen pinnoissa.



Kuva 29: Rakennetyyppien RT3-A1 ja RT3-A2 pinnoissa vaikuttavat ajasta riippuvat lämpötilat.

Kuvasta 29 nähdään, että molemmissa rakennetyypeissä lämpögradientti kasvaa täyttämisen alkuvaiheessa joksikin aikaa, jonka jälkeen lämpögradientti pysyy melkein samana vaikka betonikerroksen lämpötila kasvaa edelleen. Rakennetyypin RT3-A1 tapauksessa lämpögradientti kasvaa noin 4 vuorokauden ajan ja RT3-A2 tapauksessa noin 17 vuorokauden ajan. Lämpögradientti ja tasainen lämpötilan muutos ovat suurimmillaan stationäärisessä tilassa. Tämän takia rakennetyyppejä RT3-A1 ja RT3-A2 voidaan tutkia stationäärisessä tilassa myös talviolosuhteissa.

Taulukossa 3 on esitetty rakennetyyppien RT3-A1 ja RT3-A2 betonikerroksen pintojen lämpötilat, lämpögradientit ja tasaiset lämpötilan muutokset talviolosuhteissa stationäärisessä tilassa.

Taulukko 3: Betonikerroksen pintojen lämpötilat ja näistä laskettu tasainen lämpötilan muutos ja lämpögradientti eri rakennetyypeillä talviolosuhteissa.

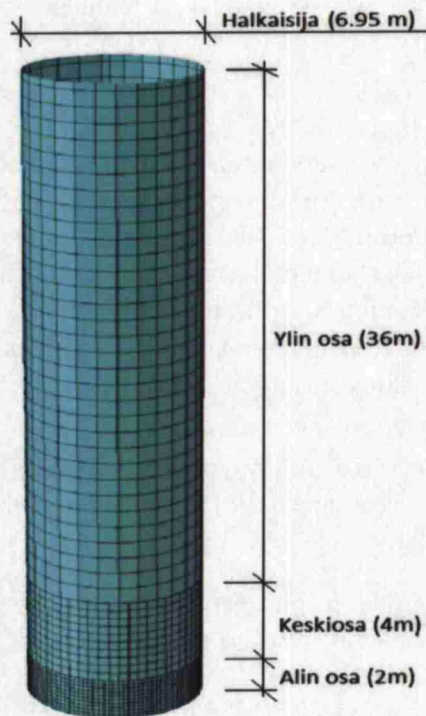
LÄMPÖTILAJAKAUMAT	$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	ΔT_c [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]
RT3-A1	48.2	41.4	6.8	24.8
RT3-A2	39.8	33.9	6.0	16.9

Taulukoista 2 ja 3 nähdään, että lämpögradientti ja tasainen lämpötilan muutos ovat pienimmillään rakennetyypissä RT3-A2 ja myös betonikerroksen lämpötila pysyy suositellussa lämpötilassa. Tämän takia varren rakennetyypiksi valittiin RT3-A2.

5.2 Varren pyörähdysymmetrinen kuorielementtimalli

Vartta tutkittiin yksinkertaistetuissa reunaehtotapauksissa: juurestaan jäykästi tuettu ja vapaasti tuettu. Varren rakenneratkaisuna käytettiin rakennetyyppiä RT3-A2. Oletettiin, että ainoastaan betonikerros toimii kantavana rakenteena. Lujuusanalyyseissä kuorielementtimallina käytettiin yksikerroksista sylinterirakennetta, jonka halkaisija oli betonikerroksen keskilinjan halkaisija 6.95 m ja seinämän paksuus 400 mm.

Kuorielementtimalli muodostui kolmesta osasta, joiden mitat juuresta alkaen olivat 2 m, 4 m ja 36 m. Näin osat pystyttiin verkottamaan vapaasti toisistaan riippumatta. Verkkoina käytettiin kvadraattisia nelikulmioelementtejä. Tarkempien tulosten saamiseksi tutkitut osa-alueet verkotettiin tiheämmiksi kuin muut osat. Esimerkiksi varren juuren tarkastelussa alin osa verkotettiin verkkotihennyksin 0.03 m ja keskiosa 0.08. Vastaavasti keskiosan tarkastelussa verkkotihennykset tehtiin toisinpäin. Ylimmän osan verkko tiheys oli 0.4 . Kuvassa 30 on esitetty kolmesta eri osasta koostuvan varren kuorielementtimalli.



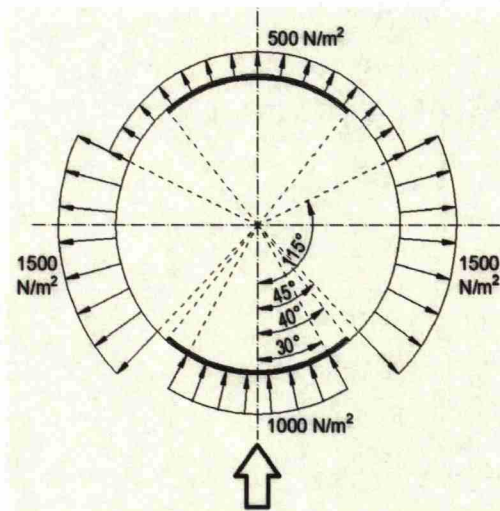
Kuva 30: Vapaasti ja jäykästi tuetun varren kuorielementtimalli, joka on koottu kolmesta osasta ja osat on verkottu eri verkkotihennyksin.

5.3 Kuormitukset

Taulukoista 2 ja 3 nähdään, että sekä talvi- että kesäolosuhteessa rakenteen pintojen lämpötilat ovat suurempia kuin valuvaiheessa. Näin betonirakenteeseen syntyi lämpötilan muutos, jonka seurauksena betonikerros lämpölaajenee. Lämpötilan

muutos kesällä on suurempi kuin talvella ja vastaavasti lämpögradientti on talvella suurempi. Tästä syystä vartta tutkittiin molemmissa olosuhteissa. Lisäksi rakennetta tutkittiin tapauksessa, jossa reaktoritorni on tyhjä ja lämpötila kaikkialla on pudonnut -20°C :een talviolosuhteissa eikä reaktoritorniin ole rakennettu lämmitysjärjestelmää estämään sisäpuolen lämpötilan alenemista ulkoilman lämpötilaan.

Tuulikuorma mallinnettiin reaktoritornin varteen kuvassa 31 esitetyllä tavalla. Kuvassa 31 esitetyt paksut viivat esittävät yläosan kautta varren yläpäähän välittyviä pystysuuntaisia voimia.



Kuva 31: Reaktoritornin varteen kohdistuva tuulikuorma.

Taulukossa 4 on esitetty varteen vaikuttavat kuormat. Lämpökuorma on stationäärisessä tilassa. Lämpökuorma on jaettu kolmeen osaan. Jokainen osa vaikuttaa eri aikoina, joten ne eivät ole integroitu toisiinsa. Tasainen lämpötilan muutos on betonikerroksen keskilinjan lämpötilan ja alkulämpötilan erotus. Gradientti on laskettu jakamalla betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero seinämän paksuudella. Yläreunan viivakuormien laskenta on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 4: Kuorielementtimallin laskennassa käytetyt ominaiskuormat. Taulukossa esitetty lyhenne T.l.m. on tasainen lämpötilan muutos. (g_k ja g_T = pysyvä kuorma, q = hyötykuorma)

Kuorma			Symboli	Arvo
Omapaino	Maan vetovoiman voimakkuus		g_{k1}	$9.81m/s^2$
Tuuli	Painekuorma tuulen puoleinen		q_{k1}	$1000N/m^2$
	Painekuorma suojan puoleinen		q_{k1}	$-500N/m^2$
	Painekuorma sivuille		q_{k1}	$-1500N/m^2$
Hydrostaattinen paine (neste $1500kg/m^3$)	Yläreunassa		g_{k2}	$265\ 000\ N/m^2$
	Alareunassa		g_{k2}	$883\ 000\ N/m^2$
Lämpökuorma	Kesä	T.l.m. Gradientti	g_{T1}	$38.50\ ^\circ C$ $-10\ ^\circ C/m$
	Talvi	T.l.m. Gradientti	g_{T2}	$16.85\ ^\circ C$ $-15\ ^\circ C/m$
	Tyhjä	T.l.m. Gradientti	g_{T3}	$-40\ ^\circ C$ $0\ ^\circ C/m$
Yläreunan viivakuormat	Yläosan omapaino		g_{k3}	$501\ 513N/m$
	Yläosan nesteen paino		g_{k4}	$590\ 000\ N/m$
	Yläosan hyötykuorma		q_{k2}	$10\ 000\ N/m$
	Yläosan tuulikuorma		q_{k1}	$\pm\ 50\ 000\ N/m$
	Yläosan tuulikuorma		q_{k1}	$12\ 000\ N/m$ (leikkausvoima)

5.4 Kuormitusyhdistelmät

Reaktoritornia rasittavat kuormitusyhdistelmät jaettiin kolmeen lämpökuormasta riippuvaan eri kuormitustapaukseen. Kuormitustapaukset lueteltiin seuraavasti:

Talviolosuhte: Torniin vaikuttavat kaikki taulukossa 4 mainitut kuormat ja lämpökuormana Talvi.

Kesäolosuhte: Torniin vaikuttavat kaikki taulukossa 4 mainitut kuormat ja lämpökuormana Kesä.

Poissa-käytöstä: Torniin vaikuttavat taulukossa 4 esitetyt omakuorma, tuulikuorma ja lämpökuormana Tyhjä.

Taulukossa 5 on esitetty eurokoodin mukaiset kuormitusyhdistelmätapaukset.

Taulukko 5: Kuorielementtimallin laskennassa käytetyt kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa. (SFS-EN 1990, yht. 6.10 ja 6.10b)

Kuormitusyhdistelmä	
KY-1	Kaikki kuormat, tuuli määräävä muuttuva kuorma $E_{d1} = 1.15 \cdot (g_{k1} + g_{k2} + g_{k3} + g_{k4} + g_{Ti}) + 1.5 \cdot q_{k1} + 0.7 \cdot 1.5 \cdot q_{k2}$
KY-2	Kaikki kuormat,hyötykuorma määräävä muuttuva kuorma $E_{d1} = 1.15 \cdot (g_{k1} + g_{k2} + g_{k3} + g_{k4} + g_{Ti}) + 1.5 \cdot q_{k2} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot q_{k1}$
KY-3A	Omapaino + tuuli $E_{d1} = 1.15 \cdot (g_{k1} + g_{k3}) + 1.5 \cdot q_{k1}$
KY-3B	Omapaino + tuuli EQU $E_{d1} = 0.9 \cdot (g_{k1} + g_{k3}) + 1.5 \cdot q_{k1}$
KY-4	Kaikki pysyvät kuormat + hyötykuorma (lumikuorma) $E_{d1} = 1.15 \cdot (g_{k1} + g_{k2} + g_{k3} + g_{k4} + g_{Ti}) + 1.5 \cdot q_{k2} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot q_{k2}$
KY-5	Kaikki pysyvät kuormat $E_{d1} = 1.35 \cdot (g_{k1} + g_{k2} + g_{k3} + g_{k4} + g_{Ti})$

5.5 Voimasuureet varressa

5.5.1 Vapaasti tuettu varsi

Vapaasti tuetun rekatoritornin varren juuren voimasuureiden laskennassa käytettiin kuvan 30 mukaista kuorielementtimallia. Jotta saadut tulokset voimasuureista tarkentuvat eri osat tihennettiin eri verkkotihennyksin. Alin osa, josta laskettiin voimasuureiden arvot verkotettiin tiheimmin. Käytettiin kvadraattisia nelikulmioelementtejä (tyyppiä S8R). Verkotus tehtiin seuraavasti: alin osa 0.03 m, keski osa 0.08 m ja ylin osa 0.4 m.

Malli kuormitettiin kuormitustapauksen **Talviolosuhte** kuormilla, koska gradientti oli itseisarvoltaan suurimmillaan (taulukko 4). Tuulikuorma jätettiin pois vapaasti tuetun tornin kuormituksessa. Koska tornin alapää oli vapaa vaakasuuntaisille siirtymille, niin tuulikuorma olisi aiheuttanut epätasapainon systeemin. Hydrostaattisen paineen suuruus on suoraan verrannollinen nesteen korkeuteen. Tästä syystä suurimmat rasitukset esiintyivät varren juuressa.

Taulukossa 6 on esitetty mallinnuksesta saadut ominaisvoimasuureet eri kuormista varren juuressa.

Taulukko 6: Vapaasti tuetun varren juuressa vallitsevat voimasuureet eri kuormista. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuorma	SF.SF1 [kN/m]	SF.SF2 [kN/m]	SM.SM2 [kNm/m]	SM.SM1 [kNm/m]
Omapaino	0	-435	0.0	0.0
Hydrostaattinen paine	3022	-575	0.0	0.0
Lämpökuorma	429	0	1.5	45.6
Hyötykuorma	0	-10	0.0	0.0

Taulukosta 6 nähdään hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman rasittavan eniten vapaasti tuetussa tilassa olevan varren rakenteita. Abaqus-ohjelmasta saatuja tuloksia verifioitiin käsinlaskennalla vapaasti tuetulle varrelle samojen kuormitusten alaisena (katso liite 4).

Taulukossa 7 on esitetty vapaasti tuetun varren juuressa vaikuttavat voimasuureet murtorajatilassa pysyvien kuormien ja hyötykuorman suhteen.

Taulukko 7: Vapaasti tuetun varren juuressa vaikuttavat voimasuureet murtorajatilassa pysyvien kuormien ja hyötykuorman suhteen kuormitusyhdistelmille. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuormitusyhdistely s	SF.SF1 [kN/m]	SF.SF2 [kN/m]	SM.SM2 [kNm/m]	SM.SM1 [kNm/m]
KY-2	3970	-1177	2	53
KY-5	4659	-1663	2	62

Taulukossa 7 nähdään, että määräävä kuormitusyhdistelmä on **KY-5** koostuu pysyvistä kuormista.

5.5.2 Jäykästi tuettu varsi

5.5.2.1 Reunahäiriö varressa

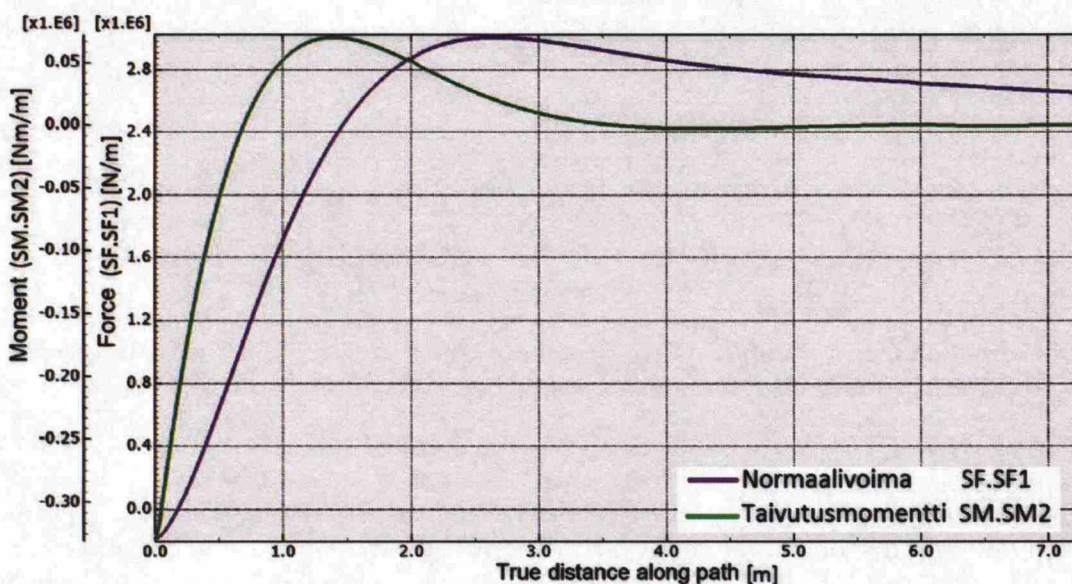
Kuten kappaleessa 3 mainittiin, jäykästi tuetun varren juuren läheisyydelle syntyy reunahäiriö. Reunahäiriö on paikallinen ja se vaimenee nopeasti tuetusta reunasta pois päin mentäessä. Reunahäiriön ulottuvuuden määrittäminen on olennaista, sillä siitä eteenpäin torni on kalvotilassa.

Lujuusanalyysi suoritettiin käyttäen samoja periaatteita kuin vapaasti tuetun tornin tapauksessa, esimerkiksi samat elementtityypit samoin verkkotihennyksin.

Varren juuren reunaehdot muutettiin jäykästi tuetuksi ja vartta kuormitettiin taulukossa 4 esiintyvillä kuormilla.

Reunahäiriö syntyy suuressa osin kuormista, jotka aiheuttavat rekenteeseen säteen suuntaisia siirtymiä. Pystysuuntaisten kuormien ja lämpögradientin vaikutukset reunahäiriöön ovat pieniä. Vastaavasti hydrostaattinen paine ja tasainen lämpötilan muutos aiheuttavat reunahäiriötä jäykästi tuetun reunan läheisyyteen. Tuulikuorman vaikutus reunahäiriön määrittelyssä jätettiin pois.

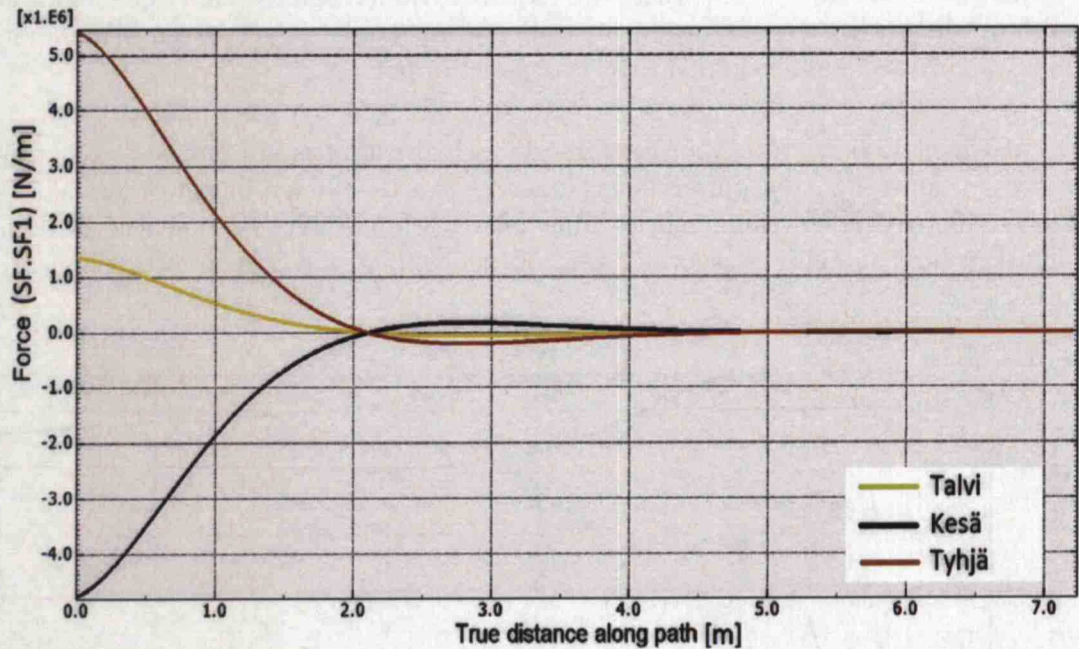
Kuvassa 32 on esitetty omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat voimasuureet varren juuren läheisyyteen. Kuvasta voidaan havaita reunahäiriöalueen ulottuvuudet. Reunahäiriö-alue päättyy kun taivutusmomentin kuvaaja muuttuu horisontaaliseksi suoraksi tai normaalivoiman kuvaaja muuttuu lineaariseksi.



Kuva 32: Omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta varren betonikerrokseen aiheutuvat voimasuureet reunahäiriöalueella. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

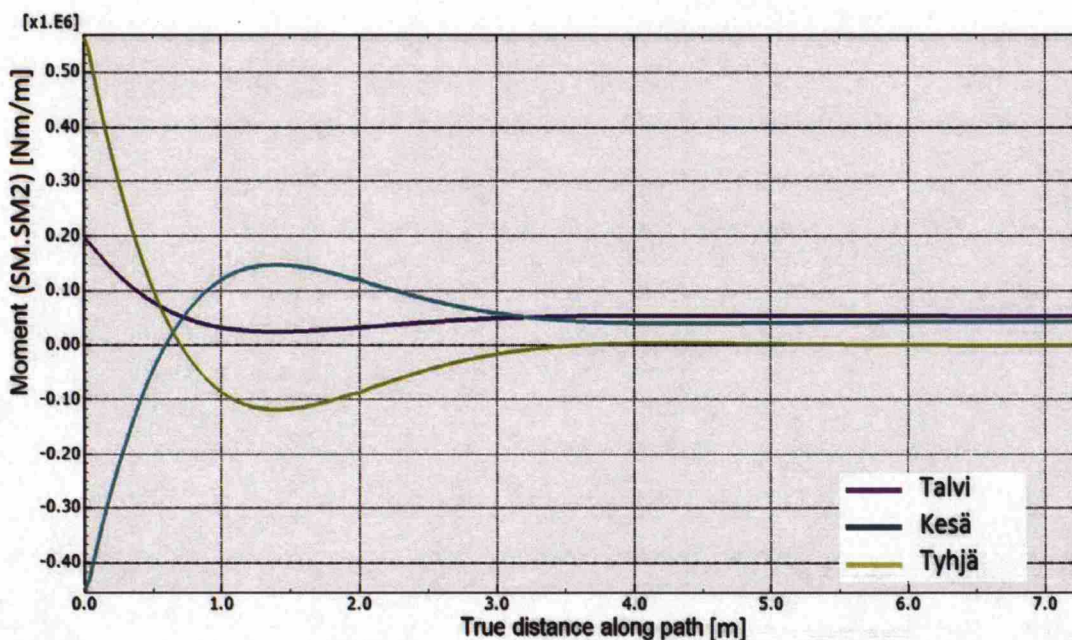
Kuvasta 32 nähdään, että oman painon ja hydrostaattisen paineen aiheuttama taivutusmomentti saa kaksi huippuarvoa reunahäiriöalueella: suurin niistä on negatiivinen varren juurella ja toinen positiivinen noin puolentoista metrin päässä juuresta. Kehän suuntainen normaalivoima pienenee juurta lähestyessä.

Seuraavaksi selvitettiin reaktoritornin varteen aiheutuva reunahäiriö ja sen ulottuvuus lämpökuormista. Mallia kuormitettiin taulukossa 4 mainituilla lämpökuormilla. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty varren betonikerrokseen aiheutuvat normaalivoima ja taivutusmomentti eri lämpökuormista reunahäiriöalueella.



Kuva 33: Lämpökuormista varren betonikerrokseen aiheutuva normaalivoima reunahäiriöalueella. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa.

Kuvasta 33 nähdään, että varren juuren läheisyydelle syntyy reunahäiriö kehän suunnassa vaikuttavan normaalivoiman suhteen. Normaalivoima esiintyy puristusvoimana tai vetovoimana riippuen betonikerroksen tasaisesta lämpötilan muutoksesta. Betonikerroksen keskilinjän lämpötilan ollessa korkeampi kuin valuvaiheessa ($+20^{\circ}\text{C}$) siihen aiheutuu puristavaa normaalivoimaa ja sen ollessa alhaisempi siihen aiheutuu vetävää normaalivoimaa. Normaalivoima lähestyy vähitellen arvoa nolla, jonka se saavuttaa noin 4 metrin päässä varren juuresta ja reunahäiriöalue päättyy.



Kuva 34: Lämpökuormista varren betonikerrokseen aiheutuva taivutusmomentti. SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Betonikerroksen tasainen lämpötilan muutos aiheuttaa reunahäiriön myös taivutusmomentin suhteen jäykästi tuetun pään läheisyydessä kuten kuvassa 34 nähdään. Kuvasta 34 nähdään, että itseisarvoltaan suurimmat taivutusmomentit vaikuttavat varren juuresta ja noin 1.5 metrin päässä juuresta. Reunahäiriön ulkopuolella taivutusmomentit ovat vakioita. Reunahäiriön ulkopuolella taivutusmomentin suuruus riippuu betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan välisestä lämpötilaerosta.

Kuvista 33 ja 34 nähdään, että betonikerroksen tasainen lämpötilan muutos aiheuttaa suuria voimasuureita betonikerrokseen varren juurelle ja tämä on otettava huomioon rakenneratkaisun määrittelyssä. Määrävin lämpökuorma juuresta syntyy kuormitustapauksessa Tyhjä, koska se aiheuttaa lämpökuormista suurinta taivutusmomenttia sekä vetävää normaalivoimaa betonikerrokseen. Lämpökuorma Kesä aiheuttaa myös suurta taivutusmomenttia juureen, mutta sen aiheuttama normaalivoima on puristava, joka saattaa kumota taivutusmomentista rakenteeseen aiheutuvia vetojännityksiä.

Omasta painosta, hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormista aiheutuvia voimasuureita verifioitiin myös käsinlaskennalla. Liitteessä 5 on esitetty käsinlaskentaa jäykästi kiinnitetyn varren rakenteeseen aiheutuvista voimasuureista (SF.SF1 ja SM.SM2).

5.5.2.2 Varren juuressa betonikerrokseen vaikuttavat voimasuureet

Taulukkoon 8 on kerätty Abaqus-ohjelmalla lasketut voimasuureet jäykästi tuetun varren juuressa kaikista taulukossa 4 mainituista kuormista.

Taulukko 8: Jäykästi kiinnitetyn varren juuressa ominaiskuormista betonikerrokseen vaikuttavat voimasuureet. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuorma		SF.SF1 [kN/m]	SF.SF2 [kN/m]	SM.SM2 [kNm/m]	SM.SM1 [kNm/m]
Lämpökuorma	Omapaino	-85	-432	-9	-2
	Hydrostaattinen paine	-48	-563	-320	-56
	Kesä	-4750	0	-449	-47
	Talvi	1349	0	195	81
	Tyhjä	5401	0	564	105
Tuulikuorma	Positiivinen	97	485	16	3
	Negatiivinen	-88	-438	-12	-3
	Lumikuorma	-2	-10	0	0

Taulukosta 8 huomataan, että mekaaniset kuormat aiheuttavat puristavia normaalivoimia ja etumerkiltään negatiivisia taivutusmomenteja. Negatiivinen taivutusmomentti aiheuttaa vetojännityksiä betonirakenteen sisäpintaan. Tuulikuorman vaikutus riippuu siitä mitä puolta vartta tutkitaan. Tuulenpuoleiseen osaan se aiheuttaa vetäviä normaalivoimia ja etumerkiltään positiivisia taivutusmomenteja ja suojapuoleiseen puristavia normaalivoimia ja etumerkiltään negatiivisia taivutusmomenteja. Lämpökuorman aiheuttamat voimasuureet riippuvat tasaisesta lämpötilan muutoksesta ja lämpögradientista.

Taulukosta 8 nähdään myös, että lämpökuormista aiheutuvat kehän suuntaiset voimasuureet ovat suurempia kuin mekaanisista kuormista aiheutuvat. Mekaaniset kuormat aiheuttavat pystysuuntaisia normaalivoimia rakenteeseen, mutta lämpökuormien vaikutus on mitätön. Lämpökuormista määräävin on Tyhjä, joka aiheuttaa suurinta vetävää normaalivoimaa ja taivutusmomenttia rakenteeseen kehän suunnassa.

Taulukossa 9 on esitetty voimasuureet murtorajatilassa eri kuormitusyhdistelmissä varren juuressa taulukossa 8 esitetyille kuormille. Kuormitusyhdistelmät on esitetty eri kuormitustapauksissa.

Taulukko 9: Jäykästi tuetun varren juuressa betonikerrokseen vaikuttavat kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa eri kuormitustapauksille. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuormitusyhdistely	Kuormitustapaus	SF.SF1 [kN/m]	SF.SF2 [kN/m]	SM.SM2 [kNm/m]	SM.SM1 [kNm/m]
KY-1	Kesäolosuhde	-6625	-1841	-975	-127
	Talviolosuhde	389	-1841	-189	21
	Poissa-käytöstä	5107	-1165	620	115
KY-2	Kesäolosuhde	-6573	-1582	-968	-125
	Talviolosuhde	440	-1582	-182	22
	Poissa-käytöstä	5158	906	627	117
KY-3A	Kesäolosuhde	-620	340	16	4
	Talviolosuhde	-620	340	16	4
	Poissa-käytöstä	-619	340	16	40
KY-3B	Stationäärinen	-975	-512	-11	-2
	Talviolosuhde	-975	-512	-11	-2
	Poissa-käytöstä	-975	-512	-11	-2
KY-4	Kesäolosuhde	-6495	-1188	-957	-123
	Talviolosuhde	519	-1188	-171	24
	Poissa-käytöstä	5237	-512	638	119
KY-5	Kesäolosuhde	-7618	-1344	-1104	-141
	Talviolosuhde	615	-1344	-182	32
	Poissa-käytöstä	6151	-583	749	140

Taulukossa 9 nähdään, että kuormitusyhdistelmä **KY-5** on kehän suuntaan vaikuttavien voimasuureiden suhteen määräävin, koska vetävä normaalivoima SF.SF1 on suurin ja taivutusmomentti SM.SM2 on suhteellisen suuri. Kuormitusyhdistelmä **KY-2** on määräävä akselin suunnassa vaikuttavien voimasuureiden suhteen, koska vetävä normaalivoima SF.SF2 on suurin ja taivutusmomentti SM.SM1 on suhteellisen suuri. Molemmat määräävät kuormitusyhdistelmät ovat kuormitustapauksessa **Poissa-käytöstä**, jossa reaktoritornin lämpötila on pudonnut ulkoilman lämpötilaan (-20°C) kaikkialla.

5.5.2.3 Neljän metrin päässä juuresta vaikuttavat voimasuureet

Edellisistä kuvista 32, 33 ja 34 nähdään, että voimasuureiden kuvaajat muuttuvat lineaarisiksi noin 4 metrin päässä juuresta (reunahäiriöalue päättyy). Tämä tarkoittaa sitä, että rakenne on päässyt kalvotilaan. Voimasuureiden määrittelyssä mallinnuksena käytettiin kuvan 30 mukaista kuorielementtimallia. Jotta saadut tulokset voimasuureista tarkentuvat keskiosa verkotettiin tiheimmin. Mallinnus tehtiin käyttäen kvadrattisia nelikulmioelementtejä (tyyppiä S8R) ja elementin sivumittoja: alin osa 0.08 m, keskiosa 0.03 m ja ylin osa 0.4 m.

Taulukossa 10 on esitetty taulukossa 4 lueteltujen kuormien aiheuttamat voimasuureet 4 metrin päässä juuresta. Koska suurin lämpögradientti aiheutuu talvella muut lämpötilakuormat jätettiin tarkastelusta pois.

Taulukko 10: Jäykästi tuetun varren betonikerrokseen aiheutuvat voimasuureet reunahäiriöalueen ulkopuolella 4 metrin päässä juuresta eri ominaiskuormista. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuorma		SF1 [kN/m]	SF2 [kN/m]	SM2 [kNm/m]	SM1 [kNm/m]
Tuulikuorma	Omapaino	2	-393	0	0
	Hydrostaattinen paine	2862	-563	-3	-1
	Lämpökuorma	0	-19	56	55
	Positiivinen	5	420	2	2
	Negatiivinen	-6	-409	-2	-2
	Lumikuorma	0	-10	0	0

Taulukosta 10 nähdään, että hydrostaattinen paine aiheuttaa suurta vetävää normaalivoimaa kehän suunnassa ja lämpökuorman aiheuttamista voimasuureista taivutusmomentti SM.SM2 on suurin. Omapaino, tuulikuorma ja lumikuorma aiheuttavat pääosin pystysuuntaisia normaalivoimia.

Seuraavaksi laskettiin voimasuureet murtorajatilassa eri kuormitusyhdistelmissä taulukossa 10 esitetyistä ominaiskuormista. Tuulikuormasta otettiin positiivisen osan tarkasteluun, joka aiheuttaa vetorasituksia betonikerrokseen. Taulukossa 11 on esitetty kuormitusyhdistelmät ja niitä vastaavat voimasuureet 4 metrin päässä juuresta.

Taulukko 11: Jäykästi tuetun varren reunahäiriöalueen ulkopuolella (4 metrin päässä reunasta) betonirakenteeseen vaikuttavat voimasuureet murtorajatilassa eri kuormitusyhdistelmille. SF.SF1 = normaalivoima kehän suunnassa, SF.SF2 = normaalivoima akselin suunnassa, SM.SM1 = taivutusmomentti akselin suuntaisen paikallisen akselin ympäri ja SM.SM2 = taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri.

Kuormitusyhdistelmä	SF.SF1 [kN/m]	SF.SF2 [kN/m]	SF.SM2 [kNm/m]	SF.SM1 [kNm/m]
KY-1	3444	-531	62.5	64.1
KY-2	3432	-1533	58.9	60.8
KY-3A	9	276	1,9	2.0
KY-3B	1969	-467	-0.2	0.0
KY-4	3437	-1164	60.5	62.2
KY-5	3866	-1316	71.2	73.0

Taulukosta 11 määrääviksi kuormitusyhdistelmät ovat **KY-5** ja **KY-3A**. Kuormitusyhdistelmä **KY-5** on määrävä kehän suunnassa, koska vetävä normaalivoima SF.SF1 ja taivutusmomentti SM.SM2 ovat suurimmat. Akselin suunnassa kuormitusyhdistelmä **KY-3A** on määrävä, koska vetävä normaalivoima SF.SF2 ja taivutusmomentti SM.SM1 aiheuttavat suurimpia vetojännityksiä betonirakenteeseen kuin muut kuormitusyhdistelmät.

5.6 Varsi jännitettynä ja teräsbetonisena rakenteena

Seuraavaksi tutkittiin varren juuren ja reunahäiriön ulkopuolista rakennetta käyttö-rajatilassa jännitettynä rakenteena ja murtorajatilassa teräsbetonisena rakenteena. Käyttörajatilassa tutkittiin betonipintojen jännitystilaa pysyvistä kuormista ja jännevoimasta. Murtorajatilassa laskettiin tarvittavat betoniraudoitukset betonirakenteen pinnoissa teräsbetonisena rakenteena.

5.6.1 Varsi jännitettynä rakenteena

Käyttörajatilassa huomioitiin ainoastaan pysyvät kuormat: omapaino, hydrostaattinen paine ja lämpökuorma. Jäykästi tuetun varren juuren runkorakenne rasittuu eniten kuormitustapauksessa **Poissa-käytöstä**. Reunahäiriön ulkopuolella ja vapaasti tuetussa varressa kuormitustapaus **Talviolosuhde** on rasittavin.

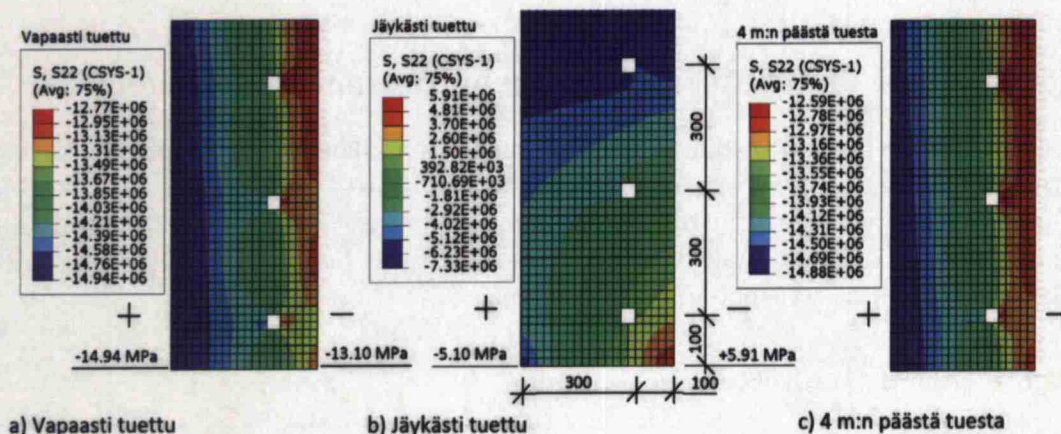
Varren jännitettyä betonirakennetta mallinnettiin aksisymmetrisellä mallilla. Jännekaapeleiden keskinäinen etäisyys toisistaan oli 300 mm ja yhteen jännekaapeliin oletettiin 10 jännepunosta. Jännekaapelin reunan etäisyys betonikerroksen ulkopintaan oli 100 mm. Alimman jännekaapelin etäisyys juuresta oletettiin olevan 100 mm. Jännekaapeli mallinnettiin mitoiltaan 38mm x 38mm suuruisella neliöllä. Käytettiin taulukossa 12 esitettyjä jänneteräksiä. Punosten esijännitys saatiin aikaiseksi asettamalla niille loppujännitys 1200 MPa.

Taulukko 12: Jännittämisessä käytetyn jännepunoksen ominaisuudet.

Materiaaliominaisuus	Arvo
Kimmomoduuli	195 GPa
Lämmönjohtavuus	45 W/(mk)
Lämpölaajenemiskerroin	12 ·10 ⁻⁹ K ⁻¹
Ominaislämpökapasiteetti	465 J/(kg·°C)
Poissonin vakio	0.3
Tiheys	7850 kg/m ³
Jännepunoksen halkaisija	15.7 mm
Jännepunoksen pinta-ala	150 mm ²

Kuvassa 35 on esitetty jännevoiman aiheuttama kehän suuntainen jännitysja-kauma jäykästi ja vapaasti tuetun varren juuresta ja 4 m korkeudella juuresta. Ku- vasta nähdään, että jännevoima aiheuttaa puristusjännityksiä betonikerroksen sisä-

ja ulkopinnassa vapaasti tuetun varren juuresta ja 4 m korkeudella juuresta. Se aiheuttaa jäykästi kiinnitetyn varren juuren sisäpintaan puristusjännityksiä ja ulkopintaan vetojännityksiä. Jännevoiman aiheuttama puristusjännitys kasvaa, mitä kauemmaksi mennään juuresta ennen kuin kiinnitetyn juuren vaikutus loppuu (vertaa kuva 35). Kuvassa merkit + ja - tarkoittavat betonikerroksen sisä- ja ulkopintaa.



Kuva 35: Betonikerroksen kehän suuntainen jännitys jakauma esijännityksestä k/k 300 mm:n jaolla.

Taulukossa 13 on esitetty betonikerroksen pintojen kehän suuntaiset jännitykset pysyvistä kuormista: lämpökuorma, hydrostaattinen paine ja omapaino sekä jännevoimasta varren juuresta ja reunahäiriön ulkopuolella (4 metrin juuresta varren päästä). Taulukossa esitetyt betonipintojen jännitykset on laskettu Abaqus-ohjelmalla kuormielementtimallilla pysyville kuormille ja aksisymmetrisellä laskentamallilla jännevoimalle. Jännevoimasta aiheutuvat jännitykset otettiin suoraan kuvasta 35. 4 m:n päästä tuelta pienimmät puristusjännitykset otettiin mukaan. Taulukossa esitetyt lyhenteet SP on sisäpinta ja UP ulkopinta.

Taulukko 13: Rakennetyypin RT3-A2 betonikerroksen kehän suuntaiset jännitys jakaumat varren juuresta ja reunahäiriön ulkopuolella pysyvistä kuormista ja jännevoimasta.

JÄNNITYSJAKAUMAT [MPa]								
Tutkittu kohta	Lämpökuorma		Hydrost. paine,		Omapaino		Pysyvät kuormat + Esijäännitys	
	SP	UP	SP	UP	SP	UP	SP	UP
Juuri (Jäykkä)	+9.97	+17.78	0	0	-0.15	-0.30	+4.72	+23.39
Juuri (Vapaa)	-1.21	+2.78	+7.56	+7.56	0.00	0.00	-8.59	-2.76
4 metriä	-1.20	+1.33	+7.17	+7.14	0.03	0.05	-8.91	-4.12

Taulukosta 13 havaitaan, että tyhjän ja ilman lämmitysjärjestelmää olevan jäykästi tuetun reaktoritornin varren betonikerroksen juureen syntyy suuria vetojännityksiä lämpökuormasta **Tyhjä**. Vapaasti tuetussa varressa ja 4 metrin päästä juuresta hydrostaattinen paine on rasittavin kuorma, mutta pysyvistä kuormista varren betonikerrokseen aiheutuvat vetojännitykset saadaan kumottua jännevoimalla. Jäykästi tuetun varren juureen aiheutuvia vetojännityksiä ei pystytä kumoamaan kuvassa 35 kuvaillun jännittämisen avulla, koska jännevoima aiheuttaa betonikerroksen ulkopintaan vetojännityksiä ja sisäpintaan pieniä puristusjännityksiä. Mikäli halutaan pienentää jännevoimasta varren juureen aiheutuvia vetojännityksiä on alimman jännekaapelin sijaittava kauempana juuresta. Liitteessä 9 on esitetty vertailu alimman jännekaapelin sijoituksesta ja jännevoiman aiheuttamasta kehän suuntaisesta jännitys jakaumasta.

5.6.2 Varsi teräsbetonisena rakenteena

Tarvittava raudoitus laskettiin murtorajatilassa poikkileikkauksen tasapainoyhtälöistä olettaen, että betoni ei kestä vetoa. Määräävä kuormitusyhdistelmä kehän suuntaan tarvittavien raudoitusten määrän suhteen oli **KY-5** varren juuresta ja 4 metrin päässä juuresta. Mutta akselin suuntaan tarvittavien raudoitusten määrän suhteen kuormitusyhdistelmä **KY-2** oli määräävä varren juuresta ja kuormitusyhdistelmä **KY-3A** 4 metrin päässä juuresta.

Vedetyissä ja taivutetuissa betonirakenteissa kaikki rasitukset otettiin vastaan teräsrudoitteilla. Puristetuissa ja taivutetuissa rakenteissa raudoitusten määrän laskennassa sovellettiin teräsbetonipilarin mitoittamiseen tarkoitettua diagrammia. Puristusterästen tai betonin halkeilun vaikutusta jännitysreusltantteihin ei huomioitu laskelmissa. Tapauksissa, joissa tarvittava raudoitusmäärä oli pieni käytettiin teräsbetonipilariin suositeltu minimiraudoitus $0.002 \cdot A_c$. Liitteessä 6 on esitetty rau-

doituksen laskentaperiaate.

Taulukossa 14 on esitetty betonikerroksen raudoitusten määrä betonikerroksen pinnoissa ja betoni-raudoitus-suhde.

Taulukko 14: Tarvittavat raudoitusmäärät varren juuresta ja reunahäiriöalueen ulkopuolella 4 metrin päässä varren juuresta. Taulukossa esitetyt lyhenteet: UP=ulkopinta, SP=sisäpinta, PR=pystysraudoitus ja VR=vaakaraudoitus

Tutkittu kohta	UP VR [mm ² /m]	UP PR [mm ² /m]	SP VR [mm ² /m]	SP PR [mm ² /m]	Kokonais- raudoitus [mm ² /m]	Kokonais- raudoitus [kg/m ³]
Juuri (Jäykkä)	12 460	1883	1690	800	16121	317
Juuri (Vapaa)	5803	800	4921	800	11524	226
4 metriä	4965	800	3930	800	10495	206

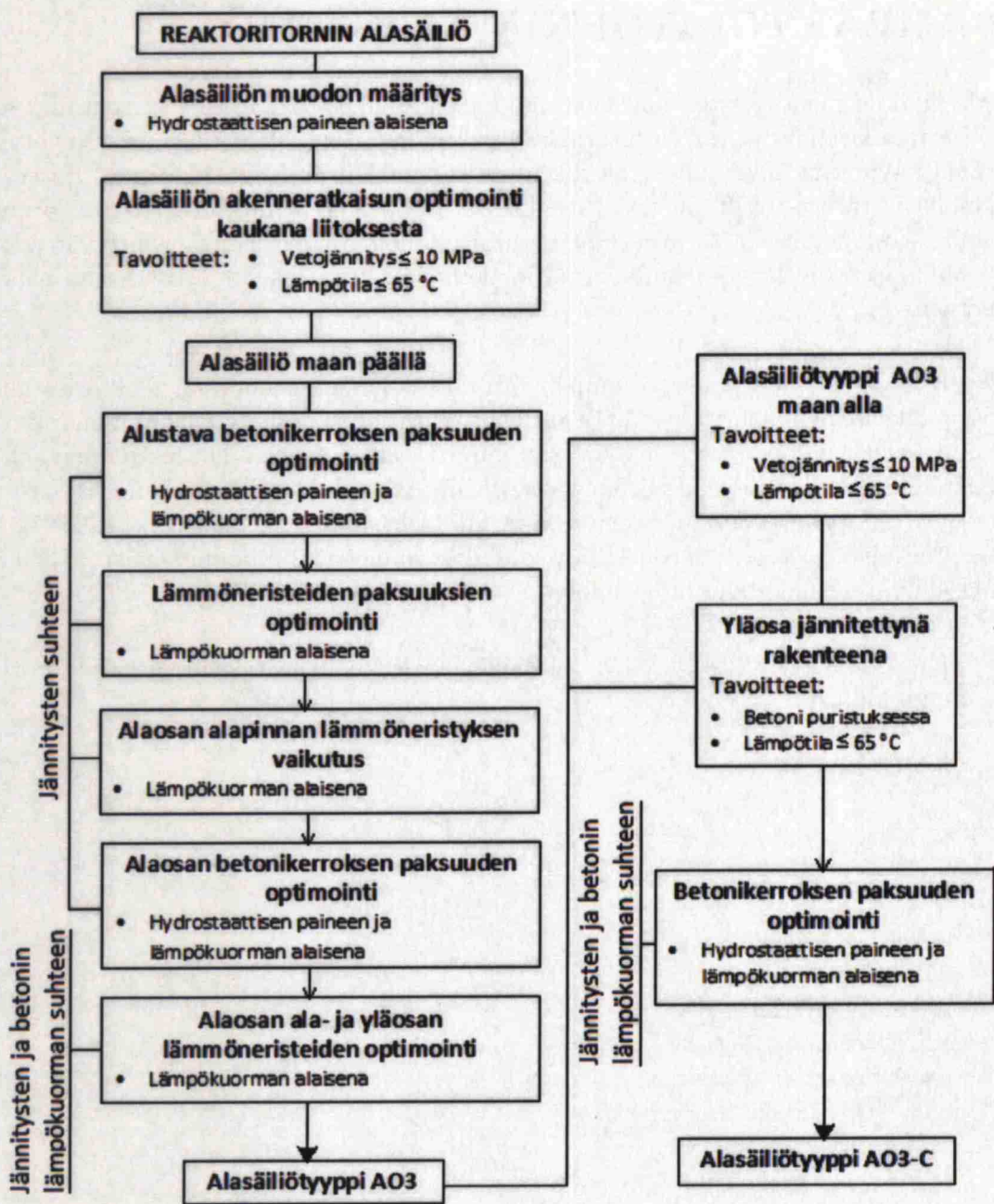
Taulukosta 14 nähdään, että vaadittava raudoitusmäärä ei mahdu betonirakenteeseen juuresta jäykästi tuetussa varressa.

6 REAKTORITORNIN ALASÄILIÖ

Alasäiliö on maata vasten makaava säiliörakenne, jonka päälle varsi tukeutuu keskeisesti. Alasäiliön ja varren liittymässä molempien osapuolten rakenteisiin syntyy epäjatkuvuuksia, mikä aiheuttaa rakenteisiin reunahäiriöitä. Varsien kaavailtu keskinäinen etäisyys on 25 metriä (kts. kuva 1). Alasäiliö toimii joko reaktoritornin ainoana perustuksena tai osana perustuksia, jolloin varren kautta välittyvät pysytysuuntaiset kuormat ja tuulikuorma johdetaan erillisin rakentein kantavaan maaperään.

Hydrostaattinen paine ja lämpökuorma ovat keskeisiä kuormia reaktoritornin osien rakenteiden määrittelyssä. Tavoitteena oli tutkia ja optimoida alasäiliön rakenneratkaisua betonikerroksessa syntyvän jännityksen ja suurimman lämpötilan suhteen kaukana alasäiliön ja varren välisestä liitoksesta. Alasäiliön rakenneratkaisut optimoitiin maanpäällisenä rakenteena ja sitä tarkasteltiin maanalaisessa rakenteessa. Alasäiliön yläosassa sovellettiin pyörähdyssymmetristä esijännittämistä. Ennen alasäiliön rakenneratkaisun optimointia sen muoto oli määriteltävä.

Kuvassa 36 on esitetty kaavio alasäiliön tarkastelun ja rakenneratkaisun optimoinnin kullusta.



Kuva 36: Alasäiliön tarkastelun ja rakenneratkaisun optimoinnin kulku.

6.1 Alasäiliön muoto

Reaktoritornin käytön aikana alasäiliöön vaikuttaa hydrostaattinen paine ja lämpökuorma. Hydrostaattinen paine alasäiliön keskiakselilla on 960 kN/m^2 . Kappaleesta 3.3.2.1 huomataan, että seinämän paksuuden muutos aiheuttaa lisää lämpöjännityksiä seinämään. Tämän perusteella pyörähdysymmetrinen alasäiliö olisi oikea valinta lämpökuormaa vastaan. Tästä syystä alasäiliön muoto määritettiin ainoastaan

hydrostaattisen paineen alaisena.

Alasäiliön muodon määrittelyssä tutkittiin muodon vaikutusta sekä alasäiliön rakenteisiin että alasäiliön ja varren liitokseen. Koska betonikerros toimii ainoana kantavana rakenteena, vain betonikuori mallinnettiin. Tarkasteltiin kahta eri alasäiliön muotoa: tasapaksu ja alaosaltaan jäykkä alasäiliö (kts. kuvaa 37). Ne tarkasteltiin ilman vartta ja varren jäykistämisvaikutusta huomioiden.

6.1.1 Alasäiliön muotojen 3D-mallinnukset

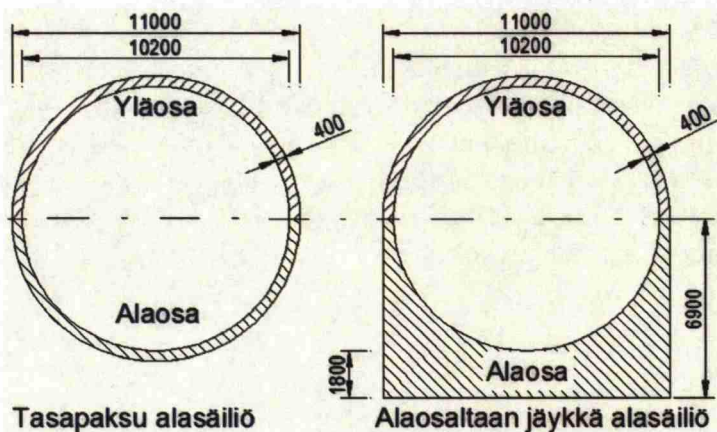
Reaktoritornin varsien kaavailtu keskinäinen etäisyys on 25 metriä. Tämän vuoksi alasäiliö mallinnettiin 25 metrin pituisena 3D-mallina. Alasäiliön muotoja, tasapak-su ja alaosaltaan jäykkä alasäiliö, mallinnettiin kahdesta osasta: alaosa ja yläosa. Yläosa oli sama molemmissa alasäiliön muodoissa.

Yläosa mallinnettiin alaspäin aukeavana tasapaksuisena puoliympyränä, jonka sisäsäteen pituus on 5.1 metriä ja paksuus 0.4 metriä . Yläosan keskellä on halkaisijaltaan 6.45 metrinen reikä. Reiän halkaisija on yhtä suuri kuin reaktoritornin varren teräsbetonirakenteen sisäsäde (kts. kuvat 37, 38 ja 39).

Alaosat olivat taas seuraavanlaiset:

- Tasapaksu ylöspäin aukeava puoliympyrä, jonka poikkileikkaus on sama kuin yläosan.
- Sisäpinnalta ylöspäin aukeava puoliympyrä ja ulkopinnat muodostuvat pysty- ja vaakasuuntaisista tasoista. Alaosan yläpinnan rakenteen paksuus on sama kuin yläosan.

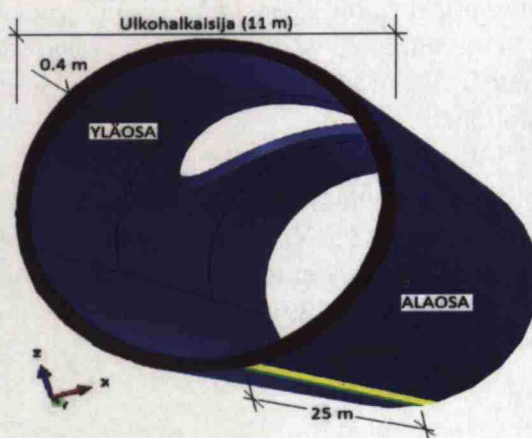
Kuvassa 37 on esitetty alasäiliön muotojen poikkileikkaukset mittoineen.



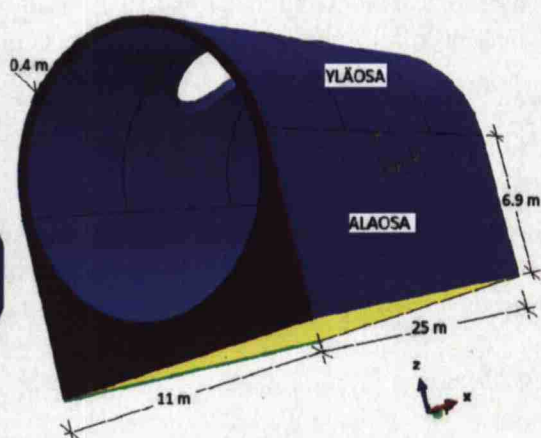
Kuva 37: Alasäiliön muotojen poikkileikkaukset.

Lujuusanalyysia varten alasäiliöön oli asetettava reunaehtoja. Kuvissa 38 ja 39 on esitetty alasäiliömuodoissa käytetyt reunaehdot. Kuvissa esiintyvät värit havainnollistavat mallinnuksessa käytettyjä reunaehtoja:

- Keltainen = pinnan siirtymät pystysuunnassa z on estetty
- Punainen = alasäiliön poikkileikkauksen siirtymät pituussuunnassa y on estetty molemmissa pinnoissaan
- Vihreä = viivan siirtymät sivusuunnassa x on estetty



Kuva 38: Tasapaksu alasäiliö päämittoineen ja reunaehtoineen

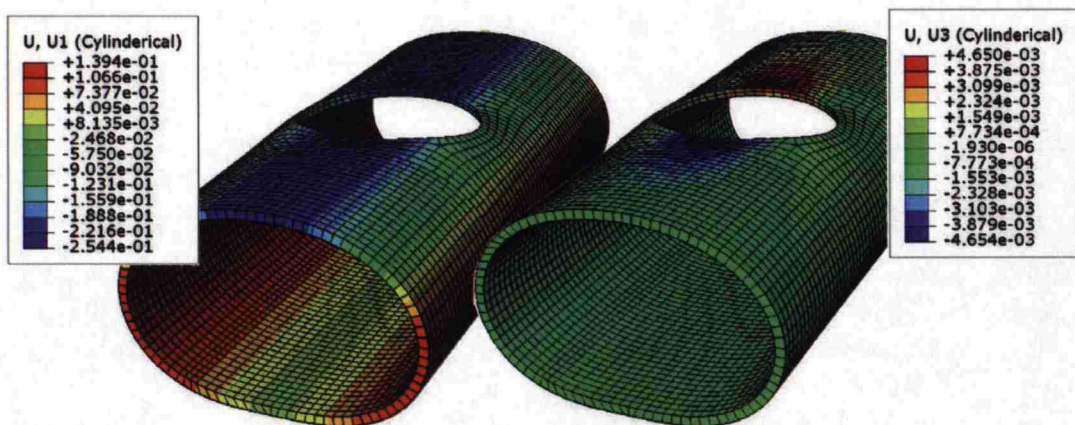


Kuva 39: Alaosaltaan jäykkä alasäiliö päämittoinen ja reunaehtoineen

Alasäiliöön mallinnettiin hydrostaattista painetta, jonka arvo alasäiliön sisäpinnan kekipisteessä oli n. 960 kN/m^2 .

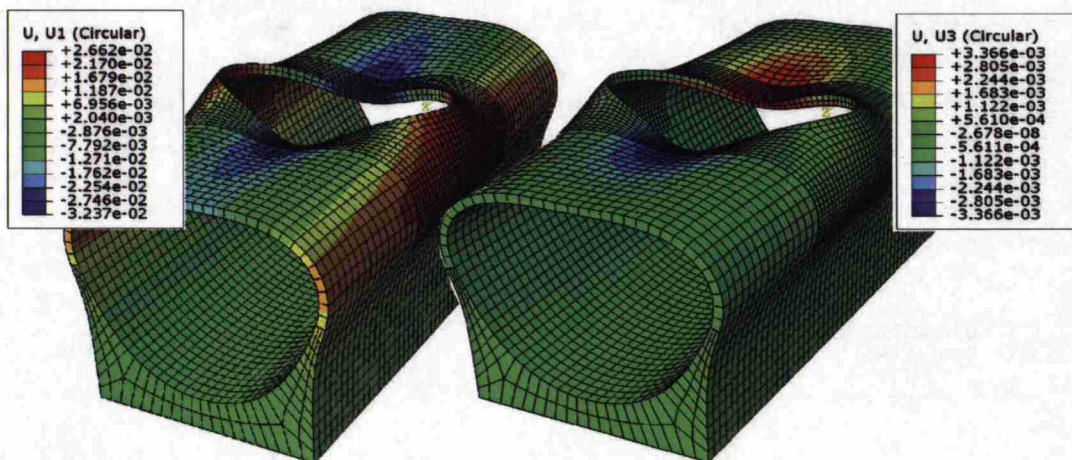
6.1.2 Alasäiliö ilman vartta

Kuvassa 40 on esitetty tasapaksun alasäiliön säteen suuntaisia ja pituusakselin suuntaisia siirtymiä hydrostaattisesta paineesta ilman varren jäykistävää vaikutusta. Koska paine kasvaa alaspäin mentäessä alasäiliön seinämässä tapahtuu epätasaisia muodonmuutoksia säteen suunnassa niin, että seinämä pullistuu sivuiltaan ulospäin ja painuu yläpinnaltaan sisäänpäin. Reiän pieli muotoutuu soikion muotoon alasäiliön edellä mainittujen siirtymien vuoksi.



Kuva 40: Tasapaksun alasäiliön siirtymät [m] säteen suunnassa (vasemmalla) ja pituusakselin suunnassa (oikealla).

Alasäiliön säteen suuntaisia siirtymiä voidaan pienentää kasvattamalla alasäiliön seinämän paksuutta. Jäykistämällä alasäiliön alaosaan säteen suuntaiset siirtymät pienenevät huomattavasti. Reiän pielet muotoutuivat aaltomaiseksi niin, että reiän reuna painui alaspäin alasäiliön pituusakselin suunnassa ja nousi sivuiltaan ylöspäin (kts. kuvaa 41). Tämä saattaa johtua siitä, että alasäiliön alaosan lisääntynyt jäykkyys rajoittaa yläosan muotoutumista. Näin reiän pielen pyrkimys samaan muotoon kuin tasapaksussa muodossa on estetty. Tästä syystä reiän ympäristöön syntyy epätasaisia muodonmuutoksia. Kuvassa 41 on esitetty säteen ja pituusakselin suuntaisia siirtymiä alaosaltaan jäykässä alasäiliössä.



Kuva 41: Alaosaltaan jäykän alasäiliön siirtymät [m] säteen suunnassa (vasemmalla) ja pituusakselin suunnassa (oikealla).

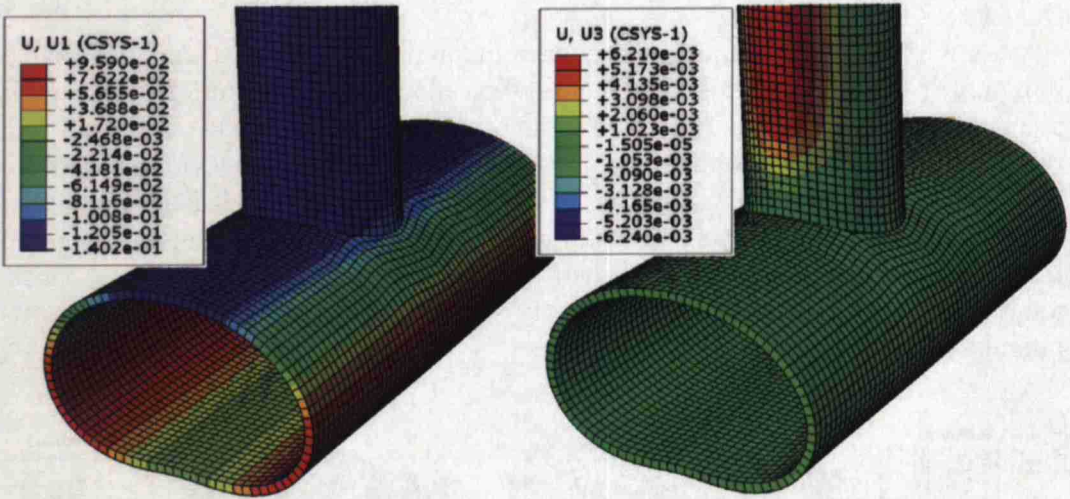
Kuvista 40 ja 41 nähdään, että säteen suuntaiset siirtymät tasapaksussa alasäiliössä ovat yli 5 kertaa suuremmat kuin alaosaltaan jäykässä alasäiliössä. Reiän

pielen pituusakselin suuntaiset siirtyvät ovat melkein samat melommissa alasäiliömuodoissa.

6.1.3 Alasäiliö varren kanssa

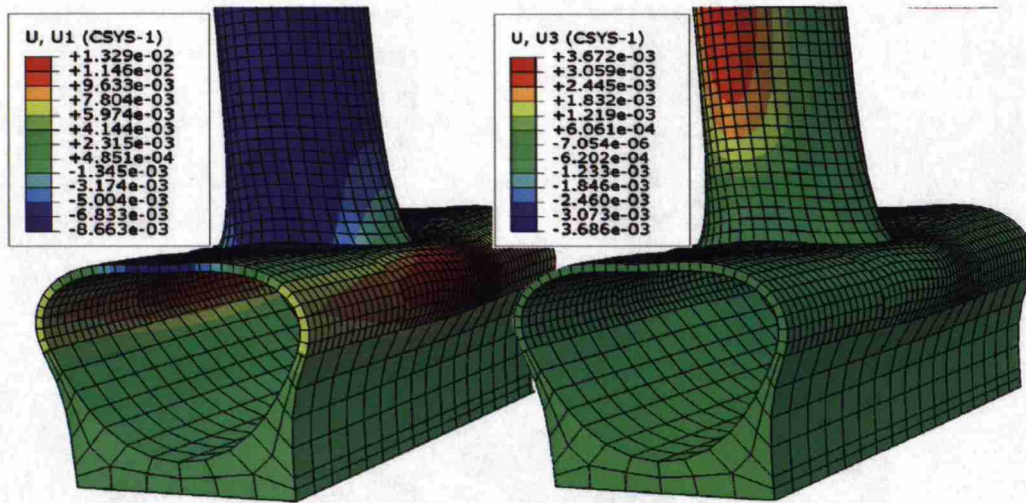
6.1.3.1 Siirtymät

Edellisessä alasäiliön siirtymien tarkastelussa reaktoritornin varren jäykistysvaikutus oli jätetty pois. Varren jäykkä kiinnitys alasäiliöön vaikuttaa reiän ympäristöön aiheutuvien muodonmuutosten uudelleenjakautumisessa. Reiän pielet ja varren juuri muotoutuisivat eri tavoin hydrostaattisen paineen vaikutuksesta, mikäli niillä olisi mahdollisuus liikkua toistensa suhteen vapaasti. Jäykän liitoksen vuoksi tämä ei ole mahdollista, vaan ne pyrkivät jakamaan muodonmuutokset uudelleen. Kuvissa 42 ja 43 on esitetty alasäiliön siirtymät säteen suunnassa ja pituusakselin suunnassa kun varsi ja alasäiliö muodostavat yhtenäisen rakenteen.



Kuva 42: Tasapaksun alasäiliön siirtymät [m] säteen suunnassa (vasemmalla) ja pituusakselin suunnassa (oikealla).

Alaosaltaan jäykässä alasäiliössä varsi tasoittaa reiän pielen aaltomaista muodonmuutosta ja pienentää myös alasäiliön säteen suuntaisia ja kehän suuntaisia siirtymiä.

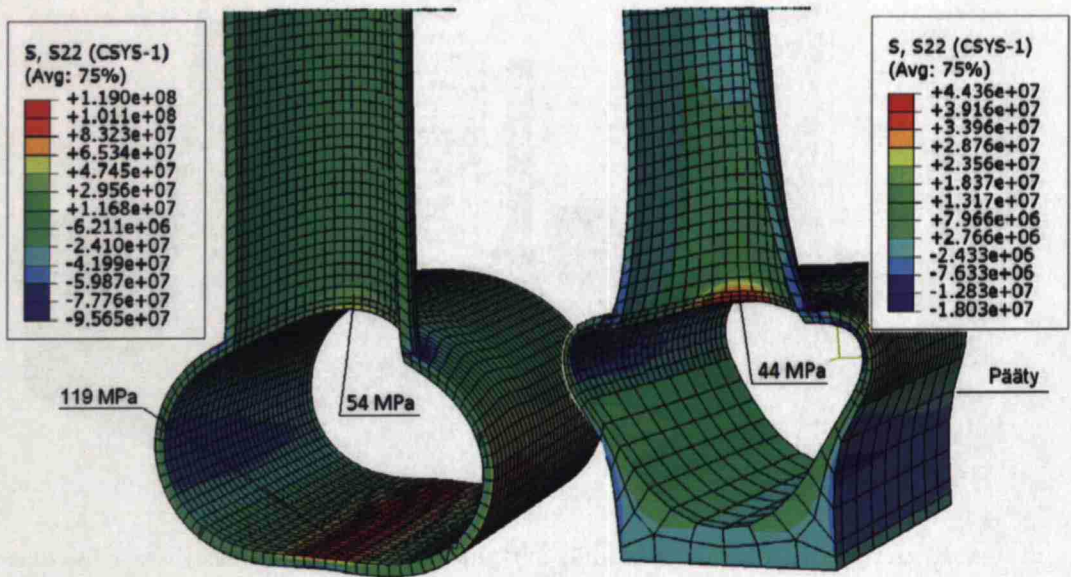


Kuva 43: Alaosaltaan jäykän alasäiliön siirtymät [m] säteen suunnassa (vasemmalla) ja pituussakselin suunnassa (oikealla)

Kuvista 42 ja 43 nähdään, että säteen suuntaiset siirtymät tasapaksussa alasäiliössä ovat yli 7 kertaa suurempia kuin alaosaltaan jäykässä alasäiliössä. Jäykkä alaosa myös vaikuttaa varren pituussuuntaisiin siirtymiin. Se pienentää niitä noin puoleen verrattuna tasapaksuun alasäiliöön.

6.1.3.2 Jännitykset

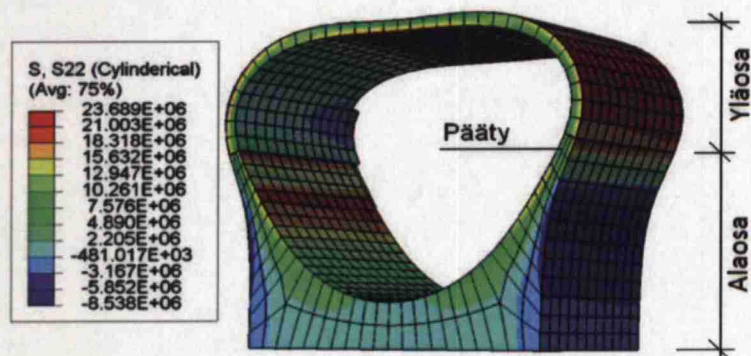
Samoista syistä kuin alasäiliön muodonmuutoksetkin, alasäiliön jännitykset eivät ole pyörähdyssymmetrisiä. Hydrostaattinen paine aiheuttaa suurimpia vetojännityksiä kehän suunnassa. Kuvassa 44 on esitetty hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat jännitysjakaumat kehän suunnassa tasapaksussa ja alaosaltaan jäykässä alasäiliössä.



Kuva 44: Hydrostaattisen paineen aiheuttama jännitysjauma [Pa] tasapaksussa (vasemmalla) ja alaosaltaan jäykässä alasäiliössä (oikealla).

Kuvasta 44 nähdään, että tasapaksussa alasäiliössä kehän suuntaiset vetojännitykset ovat suurempia kuin alaosaltaan jäykässä. Suurimmat vetojännitykset esiintyvät tasapaksun alasäiliön sisäpinnassa, jotka voivat saavuttaa jopa 120 MPa alasäiliön pohjassa. Alaosaltaan jäykässä alasäiliössä maksimivetojännitykset vaikuttavat reiän pielessä ja nämä jännitykset ovat pienempiä kuin tasapaksussa alasäiliössä vastaavassa kohdassa.

Alasäiliöissä jännitykset pienenevät liitoksesta etääntyessä (kts. kuvat 44 ja 45). Kuvassa 45 on esitetty hydrostaattisen paineen aiheuttamaa kehän suuntaista jännitysjaumaa alaosaltaan jäykän alasäiliön päädyn läheisyydessä. Siitä nähdään, että suurimmat vetojännitykset syntyvät alasäiliön yläosassa.



Kuva 45: Hydrostaattisen paineen aiheuttama jännitysjauma [Pa] alaosaltaan jäykän alasäiliön päädyn läheisyydessä kehän suunnassa.

Alasäiliön muotojen siirtymillä ja jännityksillä (kuvat 40 ... 44) saaduista tuloksista voidaan todeta, että hydrostaattinen paine aiheuttaa suurempia siirtymiä ja jännityksiä tasapaksussa alasäiliössä kuin alaosaltaan jäykässä alasäiliössä. Tästä syystä alasäiliötä tutkittiin jatkossa alaosaltaan jäykkänä rakenteena.

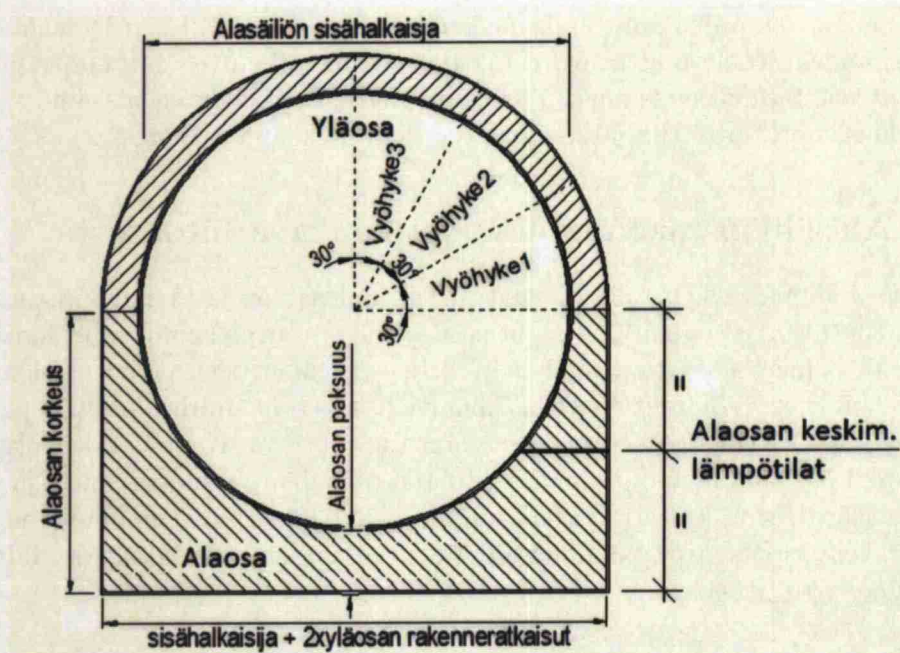
6.2 Alasäiliön rakenneratkaisut kaukana liitoksesta

Edellisessä kappaleessa 6.1.3.2 huomattiin, että alasäiliön ja varren välisestä liitoksesta aiheutuvan reunahäiriön vaikutus alasäiliössä on pienempi mitä kauempana liitoksesta ollaan. Kuvasta 45 nähdään, että hydrostaattisen paineen aiheuttamat kehän suuntaiset vetojännitykset alasäiliön yläosassa ovat suuria alasäiliön päädyssä. Tästä syystä betonikerroksen paksuutta on kasvatettava. Kantavan kerroksen (betonikerros) paksuntaminen pienentää liitoksen reunahäiriön ulottuvuutta ja sen vaikutusta rakenteisiin, koska mitä paksumpi rakenne on sitä pienempiä muodonmuutoksia rakenteisiin syntyy. Näin alasäiliötä tutkittiin kaukana liitoksesta ilman reunahäiriön vaikutuksia.

Hydrostaattinen paine ja lämpökuorma rasittavat alasäiliötä kaikkialla reaktoritornissa. Tästä syystä alasäiliön rakenteiden rakenneratkaisut optimoitiin hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman suhteen maanpäällisenä rakenteena. Optimoitua alasäiliötä tarkasteltiin puolittain ja kokonaan maanalaisena. Hydrostaattisesta paineesta aiheutuvia jännityksiä voidaan pienentää kasvattamalla betonikerroksen paksuutta, mutta lämpöjännitysten suuruuteen vaikuttavat lukuisat seikat mm. ulkoilman ja alasäiliössä olevan lietteen lämpötilat, rakennekerrosten paksuudet, käytettyjen materiaalien ominaisuudet, maaperän lämpötila ja lämmönjohtavuus.

3D-mallina käytettiin 15 metriä pitkää alaosaltaan jäykkää alasäiliötä. Se mallinnettiin kahdesta osasta: alaosa ja yläosa (kts. kuva 47). Alasäiliön muodon tutkimisessa kappaleessa 6.1.3.2 nähdään, että hydrostaattisen paineen aiheuttamat suurimmat vetojännitykset esiintyvät alasäiliön yläosassa (kts. kuva 45). Tästä syystä keskityttiin aluksi yläosan betonikerroksen jännitystilaan. Yläosa jaettiin kolmeen eri vyöhykkeeseen kuvan 46 mukaisesti. Jokainen vyöhyke oli kulmastaan 30 asteen ympyräsektori. Näin on mahdollista havainnollistaa ja paikantaa yläosassa vaikuttavia jännityksiä.

Alasäiliön alaosa on epäpyörähdysymmetrinen ja vähintään alapinnastaan maanpintaa vasten, joten sen lämpötilajakauma ei ole pyörähdysymmetrinen. Lämpöjännitysten analysoinnissa käytettiin alasäiliön keskimääräisiä lämpötiloja. Alasäiliön betonikerroksen pintojen keskimääräiset lämpötilat ja näistä lasketut tasainen lämpötilan muutos ja lämpögradientti otettiin yläosasta vyöhykkeessä 3 ja alaosasta pystyseinämän keskikorkeudella horisontaalisessa tasossa (kts. kuva 46). Kuvassa 46 on esitetty alasäiliön poikkileikkaus vyöhykkeineen.



Kuva 46: Alasäiliön poikkileikkaus ja yläosan vyöhykkeet.

Alasäiliötä rasittavan hydrostaattisen paineen arvo alasäiliön pituusakselissa oli 960 kN/m^2 . Lämpökuormana toimi lämpöjakauma, jota saatiin lämmönsiirto analyysissä olettaen betonin alkulämpötilaksi $+20^\circ\text{C}$. Alasäiliö tutkittiin sekä talvi- että kesäolosuhteissa.

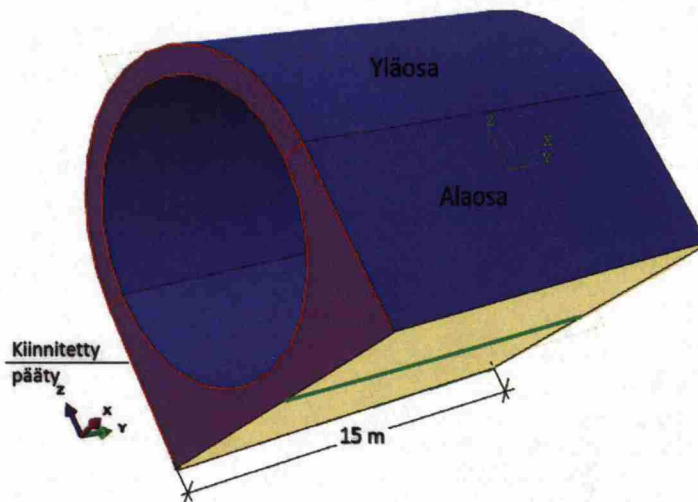
Alustavana tavoitteena oli se, että betonikerroksessa vaikuttava vetojännitys ei saa ylittää 10 MPa kohtuullisella betonikerroksen paksuudella hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena. Tavoitteeseen pyrittiin optimoimalla alasäiliön rakenneratkaisua. Optimoinnissa huomioitiin myös betonikerroksen suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa. Rakenneratkaisu optimoitiin maanpäällisenä rakenteena ja optimoitua rakenneratkaisua tarkasteltiin lisäksi maanalaisena. Lisäksi tutkittiin rakenneratkaisultaan optimoitua alasäiliön yläosaa jännitettynä rakenteena.

6.2.1 Lujuusanalyysin reunaehdot

Lujuusanalyysissä alasäiliön reunaehdot olivat seuraavasti:

- Alasäiliön liike sivusuuntaan (x-suunta) oli estetty alasäiliön alapinnan keskellä.
- Alasäiliön toisen päädyn (kiinnitetty pää) pituussuuntainen (y-suunta) liike oli estetty mutta toinen pääty (vapaa pää) oli vapaa lämpölaajenemisen suhteen.
- Alasäiliön alapinnan pystysuuntainen (z-suunta) liike oli estetty.

Alasäiliön pituus (15 metriä) on riittävä pitämään lämpölaajenemisesta aiheutuvien reunahäiriöiden vaikutukset etäällä kiinnitetystä päädyistä. Koska reaktori-tornin alasäiliö on joko jatkuva tai päädyssään suljettu, Abaqus-ohjelman laskennan tulokset otettiin pituussuunnassa kiinnitetystä päädestä. Kuvassa 47 on esitetty lujuusanalyysissä käytetyt alasäiliön reunaehdot värein havainnollistettuna.



Kuva 47: Alasäiliön muoto ja reunaehdot. Punainen pinta = siirtymät y-suunnassa on estetty, keltainen pinta = siirtymät z-suunnassa on estetty, vihreä viiva = siirtymät x-suuntaan on estetty

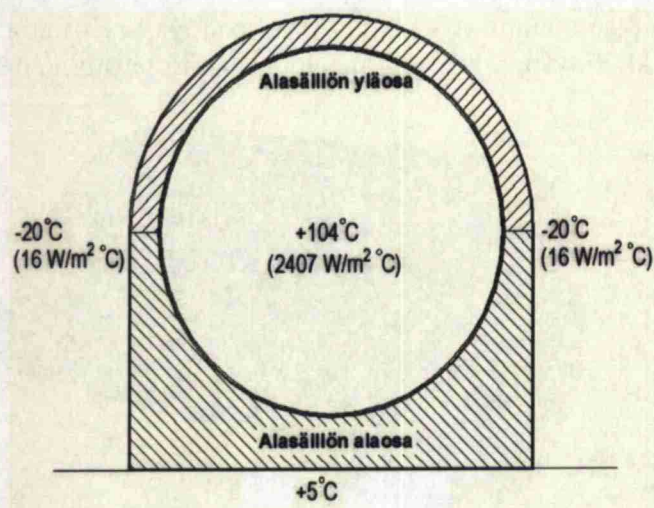
6.2.2 Lämmönsiirtoanalyysin reunaehdot

Lämmönsiirtoanalyysillä saadaan selvitettyä rakenteen lämpötilan jakauma ulkoilman ja lietteen lämpötilan sekä reunaehto- jen avulla. Lämmönsiirtoanalyysissä ulkoilman lämpötilaksi oletettiin talvella -20°C ja kesällä $+20^{\circ}\text{C}$. Ulkoilman ja neste- en lämmönsiirtokertoimina käytettiin ulkoilmalle $16.3 \text{ W/m}^2\text{C}$ ja nesteelle $2407 \text{ W/m}^2\text{C}$ [1]. Lämmönsiirtoanalyysissä käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Alasäiliö on vähintään alapinnastaan maaperää vasten eikä maaperä saa jäätyä perustusten alla routaantumisen vaaran vuoksi.

6.2.2.1 Maanpäällinen alasäiliö

Maanpäällisen alasäiliön lämmönsiirtoanalyysissä käytettiin kahta eri systeemiä ala- säiliön alapinnan lämpötilan suhteen. Näistä ensimmäisessä alasäiliön alapinnan lämpötilaksi oletettiin $+5^{\circ}\text{C}$ ja toisessa maaperän lämpötilajakauman vaikutus otet- tiin huomioon. Ensimmäistä käytettiin ainoastaan alasäiliön alustavan betonikerrok- sen paksuuden optimoinnissa. Näin saadaan selville alasäiliön alapinnan lämpötilan vaikutusta alasäiliön lämpötilajakaumaan ja lämpöjännityksiin. Toisessa systeemis- sä lämmönsiirtoanalyysi tehtiin sekä talvi- että kesäolosuhteissa.

Kuvassa 48 on esitetty alustavan betonikerroksen optimoinnissa käytetyt lämmönsiirtoanalyysin reunaehdot.



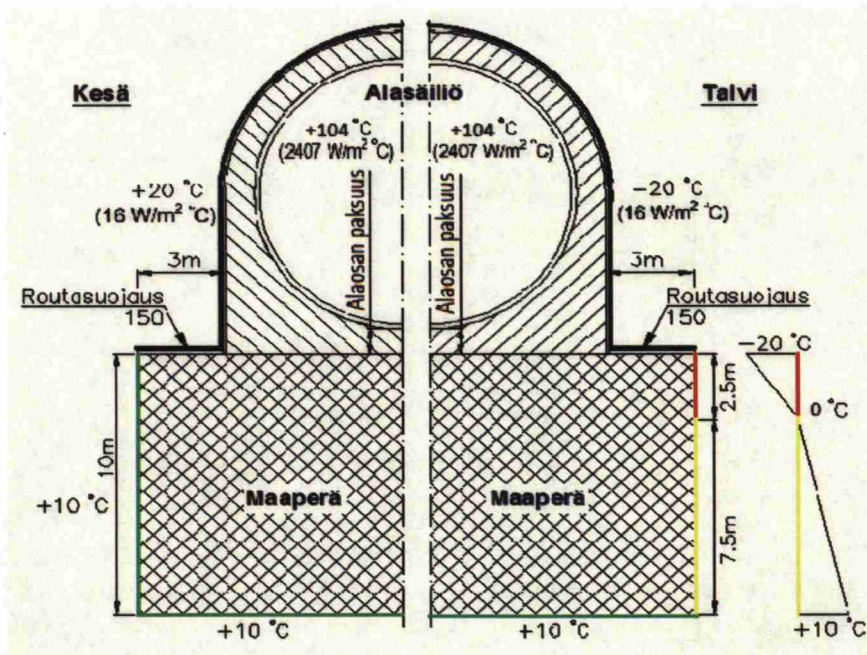
Kuva 48: Alasäiliön alustavan betonikerroksen optimoinnin lämmönsiirtoanalyysissä käytetetyt reunaehdot, jossa alasäiliön alapinnan reunaehdoksi oletettiin $+5^{\circ}\text{C}$.

Maaperän lämpötilajakaumaa huomioivassa lämmönsiirtoanalyysissä tehtiin lukuisia oletuksia maaperän reunaehdoissa (kts. kuva 49). Talviolosuhteessa oletettiin, että:

- routimissyvyys on 2.5 metriä.
- maaperän lämpötila muuttuu lineaarisesti. Lämpötila on maanpinnalla -20°C ja 2.5 metrin syvyydellä 0°C ja siitä eteenpäin se kasvaa lineaarisesti 10°C :een.
- maaperän lämpötila 10 metrin syvyydessä on 10°C .

Kesäolosuhteessa maanperän lämpötilaksi reunassa ja 10 metrin syvyydellä oletettiin 10°C (kts. kuva 49).

Jotta maaperä ei jäähtyisi alasäiliön alla alasäiliön reunat suojattiin routasuojauslevyillä. Routasuojaukset olivat paksuudeltaan 150 mm, leveydeltään 3 m. Näin alapinnan kautta maaperään siirtynyt lämpö ei pääse heti karkuun, vaan se lämmittää maaperää heikenttäen routimisvaaraa. Kuva 49 esittää maanpäällisen alasäiliön lämmönsiirtoanalyysissä käytettyä systeemiä routaeristeineen ja oletetuine reunaehdoineen talvella ja kesällä. Materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 1.



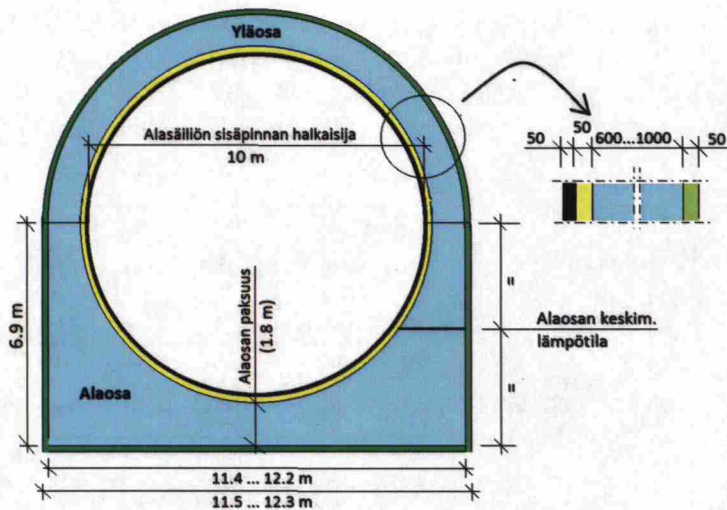
Kuva 49: Alasäiliön lämmönsiirtoanalyysissä käytetty systeemi routaeristeineen ja maaperän oletettuine reunaehtoineen talvi- ja kesäolosuhteessa. Reunaehdot on havainnollistettu värein: Musta = pinta on kosketuksessa ulkoilmaan, punainen = lämpötila kasvaa -20°C :sta 0°C :een, keltainen = lämpötila kasvaa 0°C :sta 10°C :een ja vihreä = lämpötila on 10°C

6.2.2.2 Maanalainen alasäiliö

Maanalaisen alasäiliön lämmönsiirtoanalyysissä käytettiin kuvassa 50 esitettyjä reunaehtoja. Talviolosuhteessa oletettiin, että:

- routimissyvyys on 2.5 metriä.
- maaperän lämpötila muuttuu lineaarisesti. Lämpötila maanpinnalla on -20°C ja 2.5 metrin syvyydellä 0°C ja siitä eteenpäin se kasvaa 10°C :een syvyydellä, joka on 10 metriä alasäiliön alapinnan alapuolella.
- 10 metrin syvyydellä alapinnan alapuolella maaperän lämpötila on 10°C .

Kesäolosuhteessa maanperän reunaehdoksi oletettiin 10°C (kts. kuva 50).



Kuva 51: Alasäiliön alustavassa betonikerroksen optimoinnissa käytetyt alasäiliötyypit AS1 ... AS5. Rakennekerrokset on havainnollistettu värein: musta = lujitemuovi (50 mm), keltainen = mineraalivilla (50 mm), sininen = betoni (muuttuva) ja vihreä = polyuretaani (50mm)

Alasäiliötä kuormitettiin hydrostaattisella paineella ja lämpökuormalla. Lämpökuormana toimi lämpötilajakauma, joka laskettiin lämmönsiirtoanalyysillä kuvan 48 mukaisia reunaehdoja käyttäen.

Taulukossa 15 on esitetty alasäiliötyypit ja lämmönsiirtoanalyysissä Abaqus-ohjelmasta saadut alaosan ja yläosan betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan keskimääräiset lämpötilat ja niistä lasketut tasainen lämpötilan muutos $\Delta T_{c,cl}$ ja lämpögradientti ΔT_c . Betonikerroksen pintojen keskimääräiset lämpötilat oletettiin olevan yläosassa vyöhykkeessä 3 ja alaosassa alaosan keskikorkeudella (kts. kuvat 46 ja 51). Tasainen lämpötilan muutos on betonikerroksen keskilinjan lämpötilan ja alkulämpötilan erotus.

Taulukko 15: Alasäiliötyypit ja yläosan betonikerroksen paksuudet. Alasäiliön alaosan ja yläosan betonikerroksen pintojen keskimääräiset lämpötilat $T_{c.is}$ ja $T_{c.es}$, tasainen lämpötilan muutos $\Delta T_{c.cl}$ ja lämpögradientti ΔT_c . Alasäiliötyyppien rakennekrokset ovat sisältäpäin: lujitemuovi 50 mm - mineraalivilla 50 mm - betonikerros - polyuretaani 50 mm.

Alasäiliö- tyyppi	Betoni- kerroksen paksuus [m]	Alaosa				Yläosa			
		$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]	ΔT_c [°C]	$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]	ΔT_c [°C]
AS1	0.60	64.7	37.8	31.3	26.9	60.7	49.3	35.0	11.4
AS2	0.70	64.8	35.9	30.4	28.9	60.8	47.5	34.2	13.3
AS3	0.80	65.4	34.9	30.2	30.5	61.1	46.1	33.6	15.0
AS4	0.90	65.5	33.7	29.6	31.8	61.3	44.6	33.0	16.7
AS5	1.00	65.6	33.6	29.6	32.0	61.6	43.5	32.6	18.1

Taulukosta 15 nähdään, että mitä paksumpi betonikerros on sitä korkeammaksi lämpötila betonikerroksen sisäpinnalla kasvaa ja vastaavasti sitä alhaisemmaksi se pienenee ulkopinnalla. Ulkopinnan lämpötila muuttuu enemmän kuin sisäpinnan betonikerroksen kasvaessa. Tästä syystä mitä paksumpi betonikerros on sitä suurempi on betonikerroksen pintojen lämpötilaero. Betonikerroksen tasainen lämpötilan muutos pienenee kun betonikerroksen paksuus kasvaa.

Taulukossa 16 on esitetty Abaqus-ohjelmalla lasketut itseisarvoltaan suurimmat jännitykset yläosan betonikerroksen sisä- ja ulkopinnassa vyöhykeittäin eri alasäiliötyypeissä alasäiliön kiinnitetyssä päässä. Tarkastelu tehtiin sekä kehäntaisten *S.S22* että pituussuuntaisten *S.S33* jännitysten suhteen.

Taulukko 16: Alasäiliön yläosan jännitykset hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta vyöhykkeittäin lämmönsiirtoanalyysin reunaehtojen ollessa kuvan 48 mukaisia.

	Kuormitus	Alasäiliön tyyppi	Maksimi jännitykset			
			Yläpinta		Alapinta	
			S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
Vyöhyke1	Hydrostaattinen paine	AS1	11.51	1.52	4.96	-0.33
		AS2	9.75	0.067	4.43	-0.64
		AS3	8.53	1.16	4.03	-0.30
		AS4	7.62	1.02	3.95	-0.83
		AS5	6.74	0.87	3.43	-0.26
	Lämpökuorma	AS1	6.21	1.78	-6.24	-4.60
		AS2	6.85	2.25	-6.84	-5.31
		AS3	7.50	2.67	-7.53	-5.67
		AS4	7.86	3.088	-8.39	-6.10
		AS5	8.38	3.37	-8.74	-6.43
Vyöhyke2	Hydrostaattinen paine	AS1	9.85	0.97	9.53	0.51
		AS2	8.28	0.78	9.13	0.40
		AS3	7.11	0.65	7.12	0.34
		AS4	6.00	1.02	6.64	-0.08
		AS5	5.52	0.47	5.71	0.25
	Lämpökuorma	AS1	3.04	1.81	-3.00	-3.45
		AS2	3.89	2.26	-3.48	-4.06
		AS3	4.27	2.96	-4.01	-4.41
		AS4	4.51	3.06	-4.19	-4.65
		AS5	5.13	3.36	-4.91	-5.10
Vyöhyke3	Hydrostaattinen paine	AS1	5.84	-0.67	11.74	0.85
		AS2	5.10	-0.54	10.06	0.72
		AS3	4.35	-0.45	8.81	0.62
		AS4	3.79	-0.38	7.85	0.37
		AS5	3.67	-0.33	7.08	0.48
	Lämpökuorma	AS1	1.31	1.57	-2.04	-2.64
		AS2	1.97	2.80	-1.71	-2.81
		AS3	2.31	3.00	-1.82	-3.49
		AS4	2.44	3.40	-2.10	-3.82
		AS5	2.90	3.43	-2.55	-4.21

Taulukosta 16 nähdään, että hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat jännitykset pienenevät kaikissa vyöhykkeissä betonikerroksen paksuuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että voimasuureet hydrostaattisesta paineesta pysyvät samansuuruisina betonikerroksen paksuuden kasvusta huolimatta. Vastaavasti lämpökuormasta aiheutuvat jännitykset kasvavat itseisarvoltaan kaikissa vyöhykkeissä. Tämä johtuu siitä, että betonikerroksen pintojen lämpötilaero (lämpögradientti) on suurempi mitä

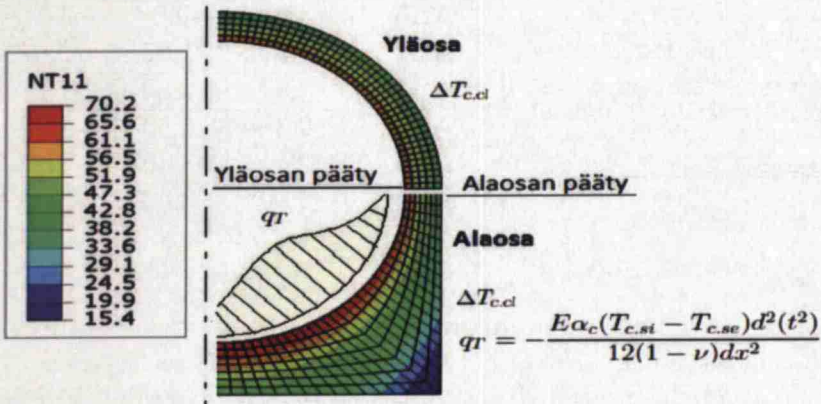
paksumpi betonikerros on.

Kuvassa 52 on esitetty alasäiliötyypin AS1 kehän suuntaisia jännitysjaakaumia hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormaasta alasäiliön kiinnitetyn päädyn läheisyydessä.



Kuva 52: Lämpökuorman (vasemmalla) ja hydrostaattisen paineen (oikealla) aiheuttama kehän suuntainen jännitysjaakauma [Pa] alasäiliötyypissä AS1 kiinnitetyn pään läheisyydessä.

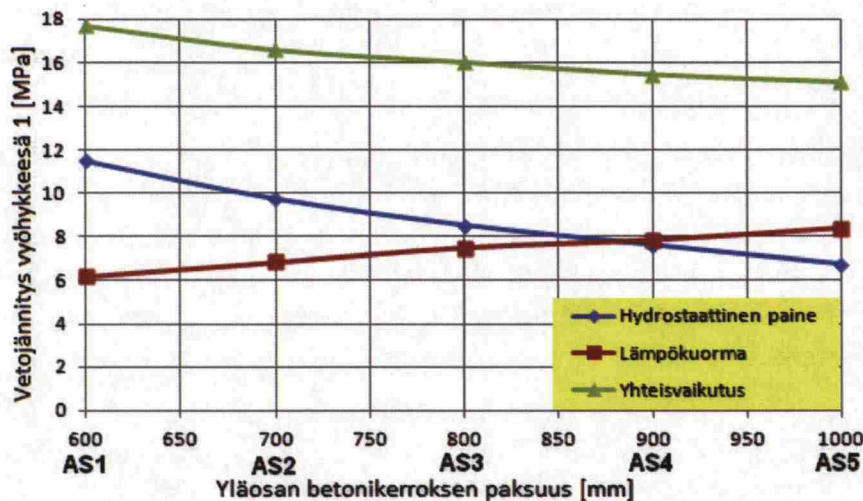
Kuvasta 52 nähdään, että lämpöjännitykset ovat suurimmillaan alaosan ja yläosan liittymän ympäristössä ja hydrostaattisen paineen aiheuttamat jännitykset yläosassa. Suuri lämpöjännitys alaosan ja yläosan liittymän ympäristössä voi johtua osien liittymäpäiden kehän suuntaisesta siirtymäerosta. Yläosan liittymän pääty siirtyy ainoastaan lämpölaajenemisen ansiosta, mutta alaosan päätyä siirtää lämpölaajenemisen lisäksi myös lämpögradientista aiheutuva painekuorma paksuudeltaan muuttuvalla rakenteella (kts. kaava 46 ja kuva 20). Kuvassa 53 on havainnollistettu lämpötilaja-kaumasta aiheutuvia tekijöitä, jotka aiheuttavat säteen suuntaisia siirtymiä alasäiliössä.



Kuva 53: Lämpötilajakaumasta aiheutuvia tekijöitä, jotka aiheuttavat säteen suuntaisia siirtymiä alasäiliössä.

Alasäiliön ylä- ja alaosa ovat geometrialtaan erilaiset ja alaosan alapinnan reunaehto eroaa muista reunoista (kts. kuvaa 48). Näin lämpötilajakaumat ja tästä johtuen lämpölaajenemiset ala- ja yläosassa ovat erilaiset.

Kuvassa 54 on esitetty hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta sekä niiden yhteisvaikutuksesta aiheutuvat vetojännitykset yläosan betonikerroksen ulkopinnassa vyöhykkeessä 1 betonikerroksen paksuuden suhteen.



Kuva 54: Hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta sekä niiden yhteisvaikutuksesta aiheutuva betonikerroksen ulkopinnan vetojännitys alasäiliön yläosan ulkopinnassa vyöhykkeessä 1.

Kuvasta 54 nähdään, että vetojännitykset kuormien yhteisvaikutuksesta pienenevät betonikerroksen kasvaessa ja betonikerroksen kasvun vaikutuksen tehokkuus pienenee samalla. Betonikerroksen paksuuden kasvattamisella ei pystytä pienentämään lämpöjännityksiä.

Koska kuormien yhteisvaikutuksesta aiheutuva vetojännitys on pienimmillään alasäiliötyypillä **AS5**, päätettiin alasäiliön yläosan betonikerroksen paksuutena käyttää 1000 mm. 1000 mm paksumpaa ei ole järkevää käyttää, koska lämpöjännityksen kasvamisen lisäksi jännevoiman vaikutus pienenee saman jännevoiman alaisena betonikerroksen paksuuden kasvaessa.

Hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat vetojännitykset ovat alle 7 MPa ja lämpöjännitykset yli 8 MPa alasäiliötyypissä **AS5**. Koska tavoitteena oli pienentää jännityksiä alle 10 MPa:iin lämpöjännityksiä oli pienennettävä. Lämmöneristeiden paksuuksien kasvattamisella voidaan vaikuttaa lämpöjännityksiin, siksi lämmöneristeiden paksuuksia oli optimoitava.

6.2.3.2 Alasäiliön lämmöneristeiden paksuuksien optimointi

Edellisessä kappaleessa alustavasti optimoitu alasäiliötyyppi **AS5** otettiin jatkotarkasteluun. Tavoitteena oli pienentää betonikerroksen ulkopintaan aiheutuvia lämpöjännityksiä alasäiliön vyöhykkeessä 1 kasvattamalla alasäiliön lämmöneristysten paksuuksia. Alasäiliötyypistä **AS5** kehitettiin 5 uutta tyyppiä kasvattamalla sisäpinnan (mineraalivilla) ja ulkopinnan (polyuretaani) lämmöneristeiden paksuuksia. Lämmöneristeiden paksuudet kasvatettiin 50 mm:n pykälän. Lämmöneristeiden paksuuksien optimointi lämpöjännitysten suhteen suoritettiin talviolosuhteessa. Lämmönsiirtoanalyysissä maaperän vaikutukset otettiin huomioon käyttämällä kuvan 49 mukaisia reunaehdoja.

Taulukossa 17 on esitetty alasäiliötyypit ja rakennekerrosten paksuudet. Rakennekerrosten järjestys on sisäpinnasta lukien: ujitemuovi + mineraalivilla + betoni + polyuretaani, jossa betonikerroksen paksuus on yläosassa. Myös taulukossa on esitetty lämmönsiirtoanalyysistä saadut betonikerroksen sisä- ja ulkopintojen keskimääräiset lämpötilat (kts. kuva 46) ja näistä lasketut tasainen lämpötilan muutos ja lämpögradientti.

Taulukko 17: Alasäiliön ala- ja yläosan betonikerroksen pintojen keskimääräiset lämpötilat $T_{c.is}$ ja $T_{c.es}$, tasainen lämpötilan muutos $\Delta T_{c.cl}$ ja lämpögradientti ΔT_c . Betonin mitta on yläosan betonikerroksen paksuus.

Alasäiliötyyppi	Rakennekerrokset [mm]	Alaosa				Yläosa			
		$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]	ΔT_c [°C]	$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]	ΔT_c [°C]
AS5	50+50+1000+50	68.8	34.5	31.7	34.3	61.6	43.5	32.6	18.1
AS11	50+100+1000+50	51.6	24.2	17.9	27.4	42.6	28.7	15.7	13.9
AS12	50+150+1000+50	40.3	17.1	8.7	23.2	30.7	19.5	5.1	11.2
AS13	50+50+1000+100	77.5	54.1	45.8	23.4	75.6	63.5	49.6	12.1
AS14	50+100+1000+100	63.6	43.4	33.5	20.2	59.5	49.4	34.5	10.1
AS15	50+150+1000+100	52.3	34.8	23.6	17.5	48.0	39.4	23.7	8.6

Taulukosta 17 nähdään, että sekä sisä- että ulkopinnan lämmöneristeiden paksuntamisella voidaan vaikuttaa betonikerroksen lämpötilajakaumaan. Mitä paksuimmat lämmöneristeet ovat, sitä pienemmät ovat betonikerroksen pintojen lämpötilaero (lämpögradientti). Ala- ja yläosan keskimääräisen tasaisen lämpötilan muutoksen välinen ero on melko pieni alasäiliötyypeittäin. Alasäiliötyyppien **AS12** ja **AS13** ala- ja yläosan lämpögradientit ovat melkein samat, mutta niiden tasaiset lämpötilan muutokset ovat erisuuruisia. Alasäiliötyypissä **AS12** alaosan tasainen lämpötila on 3.6 °C suurempi kuin yläosan ja alasäiliötyypissä **AS13** yläosan on 3.8 °C suurempi kuin alaosa.

Alasäiliötyypit kuormitettiin lämpötilajakaumalla, joka saatiin lämmönsiirtoanalyysillä talviolosuhteessa (kts. kuva 49). Taulukossa 18 on esitetty Abaqus-ohjelmalla

lasketut suurimmat lämpöjännitykset yläosan vyöhykkeessä 1 betonikerroksen sisä- ja ulkopinnassa. Jännitykset ovat kehän suunnassa *S.SS2* ja akselin suunnassa *S.SS3*.

Taulukko 18: Lämpökuormasta aiheutuvat kehän suuntaiset *S22* ja pituussuuntaiset *S33* maksimijännitykset alasäiliön betonikerroksen yläosassa sisä- ja ulkopinnassa vyöhykkeessä 1. Lämmönsiirtoanalyysin reunaehtoina käytettiin kuvan 49 talviolosuhteen mukaisia.

Alasäiliö- tyyppi	Max. jännitykset (vyöhyke 1)			
	Ulkopinta		Sisäpinta	
	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
AS5	8.94	4.72	-9.75	-5.61
AS11	7.31	4.43	-8.22	-3.92
AS12	6.28	4.26	-7.18	-3.02
AS13	6.09	2.86	-6.11	-4.45
AS14	5.25	2.48	-6.31	-3.42
AS15	4.71	2.51	-5.08	-2.84

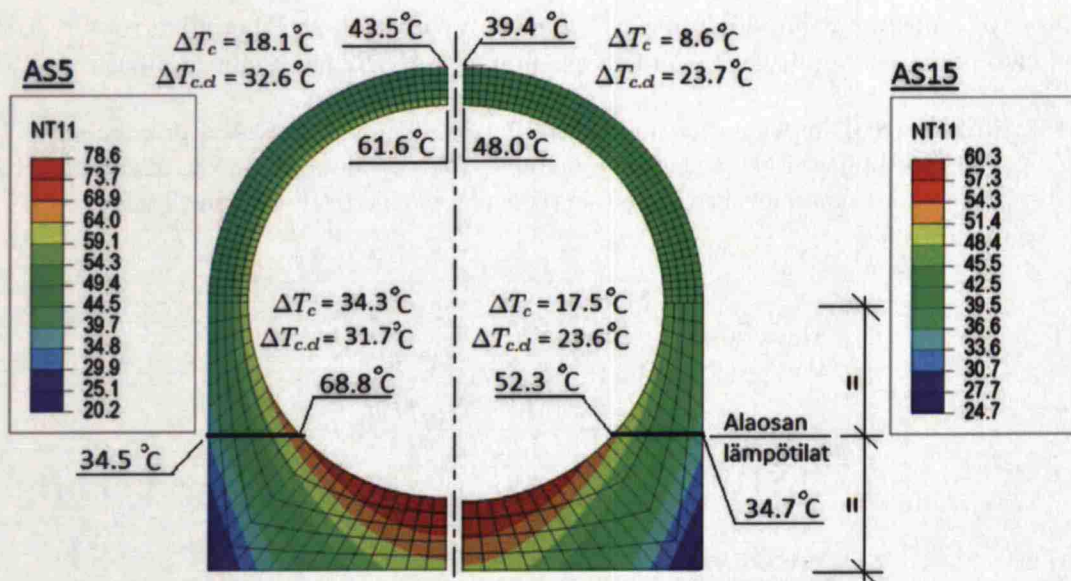
Taulukosta 18 nähdään, että sisä- ja ulkopinnan lämmöneristeiden paksuuk- sien kasvattaminen pienentää lämpöjännityksiä vyöhykkeessä 1. Yläosan ulkopin- taan syntyy vetoa ja sisäpintaan puristusta. Mitä pienempi on alasäiliön betoniker- roksen lämpögradientti sitä pienempi on lämpöjännitys (vrt. taulukot 17 ja 18).

Alasäiliötyyppejä **AS12** ja **AS13** verratessa huomataan, että tasaisen lämpötilan muutoksen ero alasäiliön osien välillä vaikuttaa lämpöjännityksiin. Suurempi tasai- nen lämpötilan muutos yläosassa kuin alaosassa pienentää lämpöjännityksiä kehän- suunnassa (vrt. taulukot 17 ja 18).

Taulukon 18 alasäiliötyyppien lämmönsiirtoanalyysissä huomioitiin maaperän lämpötilajakauman vaikutuksia (kts. kuva 49) ja taulukon 16 alasäiliötyyppien läm- mönsiirtoanalyysissä käytettiin kuvan 48 mukaisia reunaehtoja. Alasäiliötyyppi **AS5** on molemmissa taulukoissa sama.

Taulukkoita 16 ja 18 verratessa huomataan, että maaperän lämpö- tilajakau- man vaikutus lämmönsiirtoanalyysissä kasvattaa lämpöjännityksiä alasäiliö- tyy- pissä **AS5**.

Kuvassa 55 on esitetty vertailu betonikerroksen lämpötilajakaumasta alasäiliö- tyyppien **AS5** ja **AS15** välillä talviolosuhteessa.



Kuva 55: Lämpötilajakauma alasäiliötyyppien AS5 (vasemmalla) ja AS15 (oikealla) betonikerroksessa talviolosuhteessa.

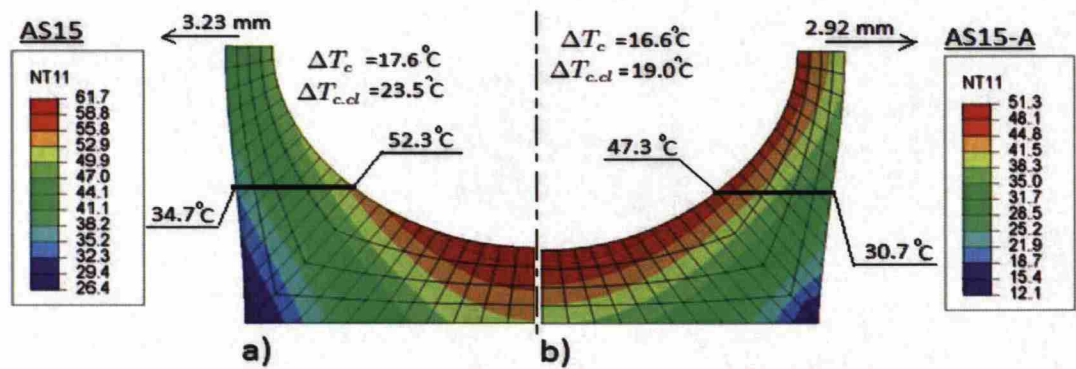
Kuvasta 55 nähdään, että ala- ja yläosan tasaiset lämpötilan muutokset ovat melkein samat alasäiliötyypeittäin, joten siitä ei aiheudu suuria jännityksiä. Lämpögradientti alasäiliötyypeissä **AS5** on suurempi kuin **AS15**. Lämpögradientista aiheutuu jännityksiä betonirakenteeseen sekä kehän suunnassa että akselin suunnassa ja siirtymiä alaosassa. Lämpögradientin aiheuttama siirtymä alaosan yläpäässä aiheuttaa lisää kehän suuntaisia vetojännityksiä ala- ja yläosan liittymän ympäristöön (kts. kuva 52).

Mitä paksumpi sisäpinnan lämmöneriste on sitä suuremmaksi betonipinnan ja lujitemuovin välinen etäisyys kasvaa, mikä saattaa hankaloittaa kuormien siirtymistä lujitemuovilta betonille. Kuten taulukosta 18 huomataan, sisäpinnan lämmöneristeiden paksuntamisen tehokkuus pienenee ulkopinnassa vaikuttavien lämpöjännitysten suhteen lämmöneristeiden paksuuksien kasvaessa. Täten lämmöneristystä ei kannattanut paksuntaa enempää kuin alasäiliötyypeissä **AS15**. Alasäiliötyyppi **AS15** otettiin jatkotutkimukseen..

6.2.3.3 Alasäiliön alaosan alapinnan lämmöneristysten vaikutus

Edellisissä alasäiliön lämpöjännitysten tarkasteluissa ulkopuolinen lämmöneriste (polyuretaani) oli jatkuva alasäiliön ulkopinnassa. Lämmöneristysten tarvetta alasäiliön alapinnassa oli tarkastettava. Tätä varten tarkastelussa käytettiin kahta eri mallia: edellisessä kappaleessa optimoitu alasäiliötyyppi **AS15** ja tästä kehitetty alasäiliötyyppi **AS15-A** poistamalla alapinnasta polyuretaanikerros. Lämmönsiirtoanalyysi tehtiin talviolosuhteessa (kts. kuva 49).

Koska rakennekerrokset ja olosuhteet yläosassa ovat samanlaiset molemmissa alasäiliötyypeissä, niin yläosan lämpötilajakaumissa ei ole oleellista eroa. Alaosan lämpötilajakaumat eroavat toisistaan alapintojen erilaisten lämmöneristävyyksien takia. Erot lämpötilajakaumissa aiheuttavat eri suuruisia säteen suuntaisia siirtymiä, erityisesti alaosan ja yläosan liittymän ympäristössä, mikä taas aiheuttaa eri suuruisia lämpöjännityksiä kehän suunnassa. Kuvassa 56 on esitetty alasäiliötyyppien AS15 ja AS15-A alaosan lämpötilajakaumat ja liittymäpäiden säteen suuntaiset siirtymät.



Kuva 56: Alasäiliötyyppien AS15 ja AS15-E alaosan lämpötilajakauma ja alaosan liittymäpäiden siirtymien arvot lämpökuormasta. a) Alasäiliön alapinnassa on 100 mm paksu polyuretaani b) Alapinnassa ei ole lämmöneristettä.

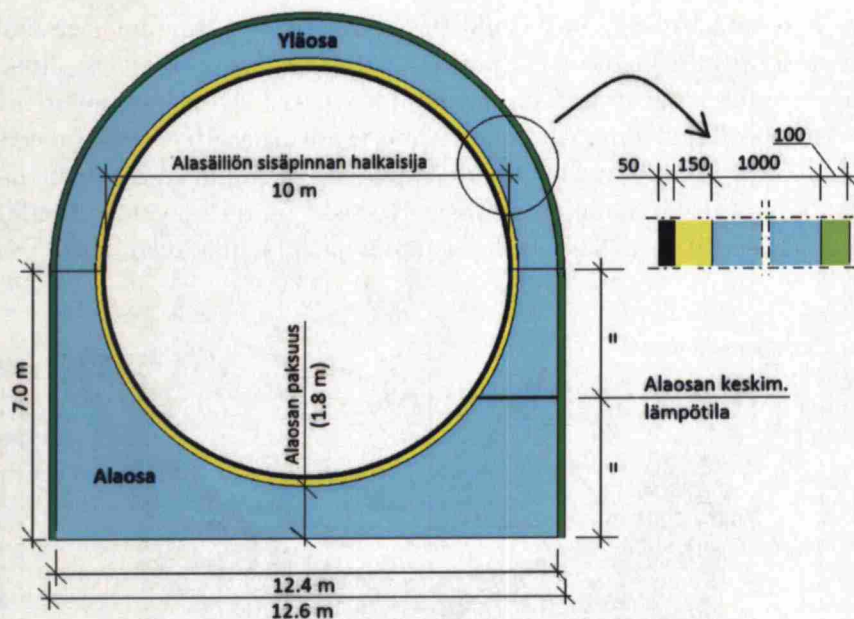
Kuvasta 56 nähdään, että lämmöneristeen poistaminen alasäiliön alta pienentää alasäiliön alaosan tasaista lämpötilaa ja lämpögradienttia sekä alaosan liittymäpään siirtymiä.

Taulukossa 19 on esitetty alasäiliön alapinnassa olevan lämmöneristeen vaikutus betonikerroksen ulkopinnan kehän suuntaisiin kehän suunnassa vaikuttaviin lämpöjännityksiin yläosan vyöhykkeessä 1.

Taulukko 19: Alasäiliön alapinnan lämmöneristeen vaikutus betonikerroksen ulkopinnan kehän suuntaisiin lämpöjännityksiin yläosan vyöhykkeessä 1

Alasäiliö- tyyppi	Tilanne alapinnassa	S.S22 [MPa]
AS15	100 mm polyuretaani	4.77
AS15-A	Ilman lämmöneristettä	4.34

Taulukosta 19 nähdään, että alapinnan lämmöneristäminen kasvattaa vetojännityksiä yläosan vyöhykkeessä 1, joten tutkitaan alasäiliötä ilman alapinnan lämmöneristystä jatkossa. Kuvassa 57 on esitetty alasäiliötyyppi AS15-A mittoineen.

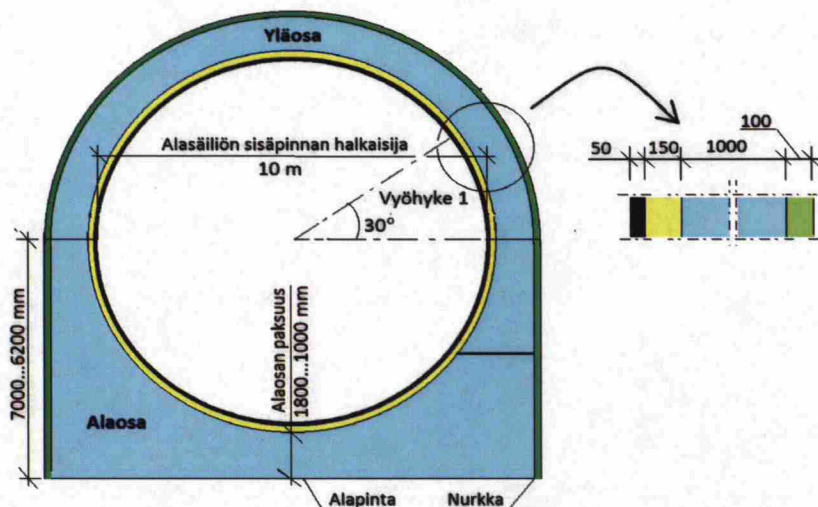


Kuva 57: Alasäiliötyypin AS16-A rakennekerrokset mittoineen.

6.2.3.4 Alasäiliön alaosan betonikerroksen paksuuden optimointi

Alasäiliötä tutkittiin tähän asti alaosan paksuuden ollessa 1800 mm. Tavoitteena oli tutkia alaosan paksuuden vaikutusta alasäiliön betonikerroksen jännityksiin. Betonikerroksen muuttaminen vaikuttaa lämpöjännityksiin ja mekaanisista kuormista (hydrostaattinen paine) aiheutuviin jännityksiin. Tästä syystä alaosan betonikerroksen paksuuden optimointi tehtiin lämpökuorman ja hydrostaattisen paineen alaisena. Alaosan paksuuden optimointi tehtiin yläosan vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa betonikerroksen ulkopintaan aiheutuvien jännitysten suhteen. Yläosan ja alapinnan jännitykset laskettiin kehän suunnassa ja nurkan pituussuunnassa.

Koska optimointi tehtiin jännitysten suhteen lämmönsiirtoanalyysi suoritettiin talviolosuhteessa (kts. kuva 49). Alasäiliötyypistä **AS15-A** kehitettiin uusia tyyppisiä **AS15-B ... AS15-E** pienentämällä alaosan paksuutta 200 mm:n pykälän. Kuvassa 58 on havainnollistettu alasäiliötyypit ja optimoinnissa tuktit kohdat: yläosan vyöhyke 1, alaosan alapinta ja nurkka.



Kuva 58: Alasäiliötyyppien AS15-A ... AS15-E rakenneratkaisut ja optimoinnissa tukiut kohdat: yläosan vyöhyke 1 sekä alaosan alapinta ja nurkka.

Taulukossa 20 on esitetty alaosan paksuuden optimoinnissa tarkastellut alasäiliötyypit, alaosan paksuudet, Abaqus-ohjelmalla lasketut kehän suuntaiset vetojännitykset betonikerroksen ulkopinnassa yläosan vyöhykkeessä 1 ja alaosan alapinnassa sekä pituussuuntaiset jännitykset alaosan nurkassa eri kuormista.

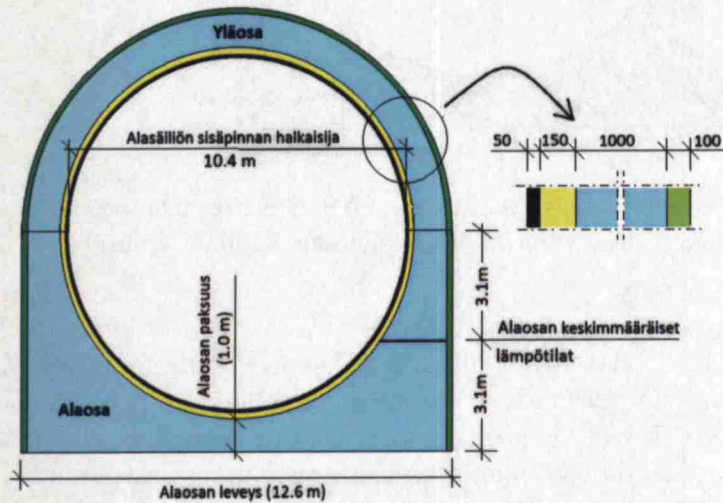
Taulukko 20: Alasäiliön yläosan vyöhykkeessä 1 sekä alaosan alapinnassa ja nurkassa vallitsevat vetojännitykset betonikerroksen ulkopinnassa alaosan eri paksuuksilla.

Kuormitus	Alaosan tyyppi	Alaosan paksuus [mm]	Yläosa	Alaosa	
			Vyöhyke 1	Alapinta	Nurkka
			S22 [MPa]	S22 [MPa]	S33 [MPa]
Hydrostaattinen paine	AS15-A	1800	6.93	2.55	-0.71
	AS15-B	1600	6.90	2.90	-0.72
	AS15-C	1400	6.87	3.24	-0.75
	AS15-D	1200	6.88	3.94	-0.78
	AS15-E	1000	6.85	4.77	-0.81
Lämpökuorma	AS15-A	1800	4.36	2.23	8.29
	AS15-B	1600	4.29	2.02	8.23
	AS15-C	1400	4.22	1.80	8.22
	AS15-D	1200	4.16	1.53	8.15
	AS15-E	1000	4.06	1.26	8.03

Taulukosta 20 nähdään, että alaosan paksuuden pienentäminen pienentää lämpöjännityksiä kaikissa tutkituissa kohdissa. Se myös pienentää hieman hydrostaattisesta paineesta aiheutuvia vetojännityksiä yläosan vyöhykkeessä 1 kehäsuunnassa, mutta se kasvattaa alaosan alapinnan kehän suuntaisia vetojännityksiä ja nurkan

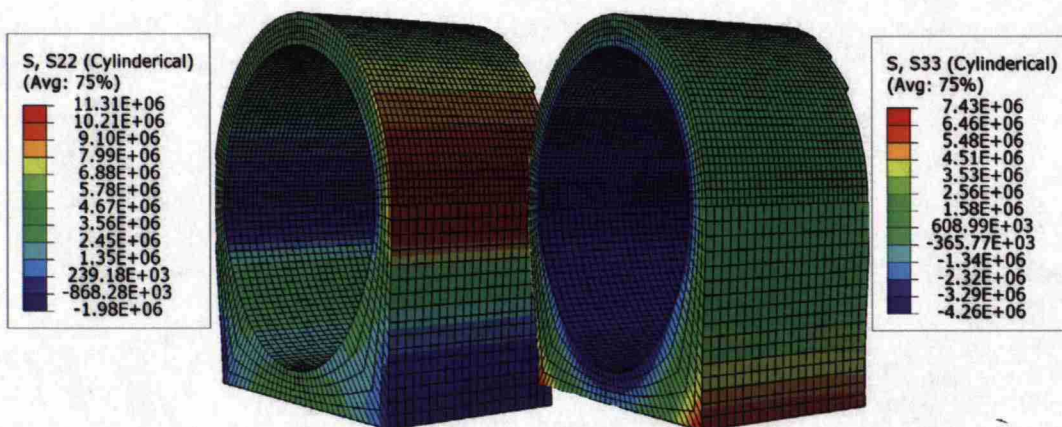
pituuksuuntaisia puristusjännityksiä.

Taulukosta 20 myös huomataan, että hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhdessä aiheuttama vetojännitys yläosassa ylittää tavoitellun 10 MPa:ia, mutta alaosan alapinnassa ja nurkassa vetojännitys jää alle 10 MPa:ia. Koska alaosan paksuuden pienentämisellä pienennettiin kehän suuntaisia vetojännityksiä yläosan vyöhykkeessä 1, päätettiin käyttää yläosan paksuista alaosaa. Näin alasäiliötyyppi **AS15-E** otettiin jatkotutkimuksiin. Kuvassa 59 on esitetty alasäiliötyyppi **AS15-E**.



Kuva 59: Alasäiliötyypin AS15-E muoto ja rakennekerrosten paksuudet. Kuvassa sisältä ulospäin värien merkitys: musta = lujitemuovi (50 mm), keltainen = mineraalivilla (150 mm), sinen = betoni ja vihreä = polyuretaani (100 mm)

Kuvassa 60 on esitetty alasäiliötyypin **AS15-E** jännitys jakauma hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta kehän- ja akselin suunnassa kiinnitetyn päädyn läheisyydessä. Siitä nähdään, että kehän suuntainen vetojännitys on edelleen suurempi kuin tavoiteltua vetojännitystä (< 10 MPa). Kehän suuntainen yhteinen vetojännitys on suurimmillaan ala- ja yläosan liittymän läheisyydessä. Alasäiliön ala- ja yläosan lämmöneristeitä on optimoitava jotta lämpöjännitykset saadaan pienennettyä kehän suunnassa. Akselin suuntainen vetojännitys on suurimmillaan alasäiliön nurkassa ja se on hyvin paikallinen.



Kuva 60: Alasäiliön AS15-E jännitysjaakauma [Pa] kehän suunnassa S22 (vasemmalla) ja akselin suunnassa S33 (oikealla) hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta.

6.2.3.5 Alasäiliön ylä- ja alaosan lämmöneristeiden optimointi

Kappaleissa 6.2.3.1 ... 6.2.3.4 optimoitiin alasäiliön rakennekerrosten paksuudet hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena. Optimointi tehtiin talviolosuhteessa lämpökuormien suhteen. Kuormien yhteisvaikutus aiheutti suurempia vetojännityksiä kuin tavoitettua 10 MPa yläosan vyöhykkeessä 1, erityisesti alaosan ja yläosan liittymäkohdassa.

Lämpökuorman aiheuttamia vetojännityksiä vyöhykkeessä 1 yritettiin pienentää pienentämällä lämpötilajakaumasta aiheutuvien ala- ja yläosan liittymäpäiden siirtymien eroa. Tämän takia ala- ja yläosan lämmöneristeitä oli optimoitava. Optimointi tehtiin alasäiliön betonikerroksen pitkäaikaisen maksimilämpötilan ja betonikerrokseen aiheutuvien lämpöjännitysten suhteen sekä talvi- että kesäolosuhteessa. Jännitykset tarkasteltiin yläosan vyöhykkeessä 1 ja alaosan alapinnassa kehän suunnassa ja alasäiliön nurkassa pituussuunnassa. Betonin suositellaan olevan alle 65 °C pitkäaikaisessa lämpötilassa [10]. Talvella ulkolämpötila oletettiin -20 °C ja kesällä +20 °C. Lämmön- siirtoanalyysissä käytettiin kuvan 49 mukaisia reunaehtoja.

Alasäiliön yläosan lämmöneristeiden optimointi

Alasäiliötä **AS15-E** oli tutkittu ainoastaan taviolosuhteessa lämpöjännitysten suhteen. Tavoitteena oli optimoida alasäiliön yläosan lämmöneristeitä sekä talvi- että kesäolosuhteessa betonikerroksessa vaikuttavien lämpöjännitysten lisäksi myös pitkäaikaisen lämpötilan suhteen. Alasäiliön **AS15-E** (kuva 59) lämmönsiirtoanalyysissä käytettiin kuvan 49 mukaisia reunaehtoja talvi- ja kesäolosuhteessa.

Taulukossa 21 on esitetty alasäiliötyypin **AS15-E** ala- ja yläosan betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan keskimääräiset lämpötilat $T_{c,es}$ ja $T_{c,is}$ (kts. kuva 46) ja näistä lasketut yläosan keskimääräinen lämpötilan muutos $\Delta T_{c,d}$ ja lämpögradientti ΔT_c .

Taulukossa on myös esitetty kehän suuntaiset maksimilämpöjännitykset yläosan vyöhykkeessä 1 ja alaosan alapinnassa sekä pituusuuntainen lämpöjännitys alasäiliön nurkassa.

Taulukko 21: Alasäiliötyypin **AS15-E** ala- ja yläosan betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan keskimääräiset lämpötilat $T_{c.es}$ ja $T_{c.is}$ ja näistä lasketut yläosan keskimääräinen lämpötilan muutos $\Delta T_{c.cl}$ ja lämpögradientti ΔT_c ja maksimi lämpöjännitykset yläosan vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja alasäiliön nurkassa.

	Lämpötila						Jännitykset		
	Alaosa		Yläosa				Yläosa	Alaosa	
	$T_{c.is}$	$T_{c.es}$	$T_{c.is}$	$T_{c.es}$	$\Delta T_{c.cl}$	ΔT_c	Vyöhyke1	Alapinta	Nurkka
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	S.S22 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
Talvi	47.0	31.9	47.9	39.3	23.6	8.6	4.05	1.27	8.36
Kesä	60.4	50.8	66.0	60.2	39.8	5.8	2.38	1.43	6.84

Taulukosta 21 nähdään, että yläosan betonikerroksen lämpötilan muutos kasvaa kesällä ja sen lämpögradientti pienenee. Myös sen lämpötila ylittää hieman betonille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa. Kesällä lämpöjännitykset ovat pienempiä kuin talvella yläosassa ja alaosan nurkassa, mutta ne ovat suurempia hieman alaosan alapinnassa.

Alasäiliötyypin **AS16-E** rakennekerrokset ja lämmöneristeet voidaan pitää alasäiliön yläosan optimoituna rakenneratkaisuna, koska

- sisäpuolisen lämmöneristävyuden parantaminen pienentää yläosan keskimääräistä lämpötilan muutosta ja sen lämpölaajenemista, mikä kasvattaa lämpöjännityksiä vyöhykkeessä 1,
- sisäpuolisen lämmöneristävyuden huonontaminen nostaa betonin lämpötilaa yli suositellun lämpötilan (kts. taulukko 21),
- ulkopuolisen lämmöneristävyuden parantaminen nostaa betonin lämpötilaa kesällä,
- ulkopuolisen lämmöneristävyuden huonontaminen taas pienentää yläosan keskimääräistä lämpötilan muutosta ja lämpölaajenemista.

Alasäiliön alaosan lämmöneristeiden optimointi

Hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta aiheutuvat vetojännitykset ovat suurimmillaan ala- ja yläosan liittymäkohdassa (kts. 60). Jotta lämpöjännitysten osuus voidaan pienentää on ala- ja yläosan liittymäpäiden siirtymäeroja pienennettävä. Tähän tavoitteeseen pyritään pienentämällä alaosan lämpötilan muutosta ja lämpö-

gradienttia, joten alaosan sisäpuolista lämmöneristävyttä oli parannettava.

Alaosan lämmöneristeiden optimointi tehtiin betonirakenteeseen aiheutuvien lämpöjännitysten ja korkeimman lämpötilan suhteen talvi- ja kesäolosuhteessa. Tutkitiin 6 eri alasäiliötyyppiä, joiden rakennekerrosten materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Betonikuori ja yläosan rakenneratkaisut pysyvät samanlaisina kuin alasäiliötyypissä **AS15-E** (kts. kuva 59). Alaosan sisäpuolista mineraalivillaa korvattiin 25 mm pykälän lämmöneristävyydeltään paremmalla lämmöneristeellä (polyuretaani). Alaosan rakenne sisäpinnasta ulkopintaan oli eri alasäiliötyypeillä:

- **AS15-E**: lujitemuovi 50 mm - mineraalivilla 150 mm - betoni - polyuretaani 100mm.
- **AO1**: lujitemuovi 50 mm - mineraalivilla 100 mm - polyuretaani 50 mm - betoni - polyuretaani 100mm.
- **AO2**: lujitemuovi 50 mm - mineraalivilla 50 mm - polyuretaani 100 mm - betoni - polyuretaani 100mm.
- **AO3**: lujitemuovi 50 mm - mineraalivilla 25 mm - polyuretaani 125 mm - betoni - polyuretaani 100mm.
- **AO4**: lujitemuovi 50 mm - polyuretaani 150 mm - betoni - polyuretaani 100mm.
- **AO5**: lujitemuovi 50 mm - polyuretaani 150 mm - betoni - routaeriste 100mm.

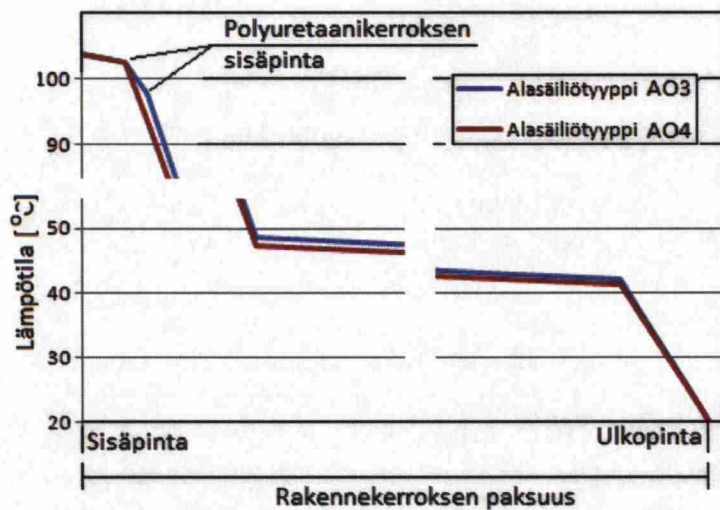
Alasäiliötyyppien lämmönsiirtoanalyysissä käytettiin kuvan 49 mukaisia reunaehtoja. Lujuusanalyysissä alasäiliötyypit kuormitettiin lämmönsiirtoanalyysissä saaduilla lämpötilajakaumalla. Taulukossa 22 on esitetty alaosan sisä- ja ulkopinnan keskimääräisistä lämpötiloista laskettu alaosan keskimääräinen lämpötilan muutos, lämpögradientti ja alaosan betonikerroksen maksimi lämpötila sekä lämpökuormasta aiheutuvia jännityksiä yläosan vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa kesä- ja talviolosuhteessa.

Taulukko 22: Alasäiliön alaosan keskimääräinen lämpötilan muutos, lämpögradientti ja alaosan betonikerroksen maksimi lämpötila sekä lämpökuormasta aiheutuvia jännityksiä yläosan vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa kesä- ja talviolosuhteessa.

	Alasäiliö- tyyppi	Lämpötila			Jännitykset		
		Alaosa			Yläosa	Alaosa	
		$\Delta T_{c,cl}$	ΔT_c	T_{max}	Vyöhyke 1	Alapinta	Nurkka
		[°C]	[°C]	[°C]	S.S22 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
Talvi	AS15-E	18.9	15.0	52.1	4.05	1.27	8.36
	AO1	13.3	13.1	44.7	3.37	1.10	7.35
	AO2	8.7	11.7	40.2	2.83	1.01	6.84
	AO3	6,8	11.0	39.2	2.61	0.96	6.63
	AO4	5.1	10.6	38.2	2.41	0.96	6.45
	AO5	-4.6	14.2	31.4	2.57	0.77	6.15
Kesä	AS16-E	35.5	9.4	66.0	2.38	1.43	6.84
	AO1	30.8	8.0	61.1	1.83	1.31	6.30
	AO2	27.2	6.6	59.4	1.41	1.23	5.91
	AO3	25.6	5.9	58.5	1.23	1.20	5.74
	AO4	24.4	5.8	57.8	1.08	1.14	5.60
	AO5	19.2	7.6	53.4	1.17	1.06	5.31

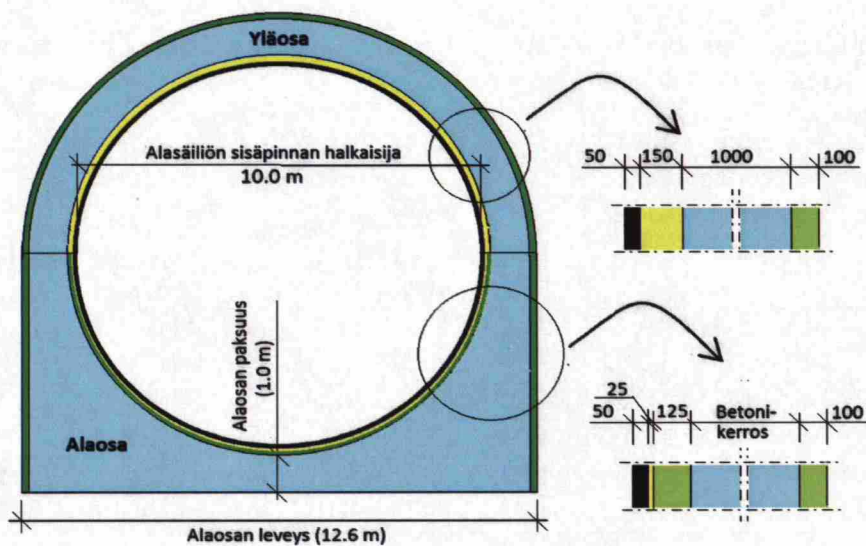
Taulukosta 22 nähdään, että sisäpuolisen lämmöneristävyuden parantaminen pienentää betonikerroksen keskimääräistä lämpötilaa ja lämpögradienttia sekä vetojännityksiä. Lisäksi alaosan betonikerroksen lämpötila ei ylitä suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa (65°C). Vaikka ulkopuolisen lämmöneristävyuden pienentäminen pienentää alaosan betonikerroksen lämpötilan muutosta, kasvaa sen lämpögradientti ja lämpöjännitykset yläosan vyöhykkeessä 1 (vertaa alasäiliötyypit AO4 ja AO5).

Polyuretaania voidaan käyttää pitkäaikaisesti lämpötila-alueella −200...+100°C [12]. Alasäiliötyyppien **AO3** ja **AO4** sisäpuoliset polyuretaanit ovat niin lähellä sisäpintaa, että ne voivat joutua alttiiksi korkealle lämpötilalle erityisesti kesällä. Kuvassa 61 vertailtiin molempien alasäiliötyyppien keskimääräistä lämpötilajakaumaa kesäolosuhteessa (kts. kuvaa 59).



Kuva 61: Alasäiliötyyppien AO3 ja AO4 alaosan keskimääräinen lämpötilajakauma.

Kuvasta 61 nähdään, että polyuretaanin lämpötila ylittää lämpötilan +100 °C rajaa alasäiliötyyppissä AO4, mutta alasäiliötyyppissä AO3 lämpötila pysyy alle +100 °C:ssa. Näin vetojännityksen ja pitkäaikaisen lämpötilan suhteen optimoiduksi alasäiliötyyppiksi saatiin AO3 maanpäällisenä rakenteena. Kuvassa 94 on esitetty optimoitu alasäiliötyyppi AO3, jossa alaosan ja yläosan rakennekerrokset ovat erilaiset.



Kuva 62: Alasäiliötyyppin AO3 rakenneratkaisu. Rakennekerrokset havainnollistettu värein: musta = lujitemuovi, keltainen = mineraalivilla, sininen = betoni ja vihreä = polyuretaani.

6.2.4 Alasäiliö maan alla

Reaktoritornin alasäiliö saatetaan rakentaa osittain tai kokonaan maanalaisena, tästä syystä alasäiliö tutkittiin myös puolittain ja kokonaan maanalaisena. Alasäiliön ollessa maan alla siihen vaikuttaa hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman lisäksi myös maanpaine. Maanpaine kuormittaa alasäiliötä vastakkaiseen suuntaan kuin hydrostaattinen paine, joten se kumoaa jonkin verran hydrostaattisesta paineesta kehän suuntaan aiheutuvia vetojännityksiä.

Reaktoritornin käyttöaikana alasäiliön seinämä pyrkii laajenemaan ulospäin sekä hydrostaattisen paineen että lämpökuorman alaisena. Alasäiliötyypin **AO3** ala- ja yläosan liittymän siirtymä (4 mm) on pienempi kuin 0.2 % alaosan korkeudesta (124 mm), joten siirtymä ei edellytä passiivisen maanpaineen muodostumista. Reaktoritornin ollessa poissa käytöstä siihen vaikuttaa joko lepopaine tai aktiivinen maanpaine riippuen rakennekerroksen jäykkyystasosta. Koska lepopaine on pienempi kuin passiivinen maanpaine alasäiliötä kuormitettiin lepopaineella olettaen maan liukumaluvuksi 0.6.

Alasäiliötä tarkasteltiin sekä puolittain että kokonaan maanalaisena. Tarkasteltiin ensin betonikerroksen lämpötiloja talvi- ja kesäolosuhteessa. Lämmönsiirtoanalyysissä käytettiin kuvan 50 mukaisia reunaehtoja. Taulukossa 23 on esitetty lämmönsiirtoanalyysissä Abaqus-ohjelmalla laskettuja ala- ja yläosan betonikerroksen pintojen keskimääräisiä lämpötiloja sekä alaosan maksimilämpötilaa. Lisäksi siinä on esitetty lämpötilan muutokset ja alaosan lämpögradientit.

Taulukko 23: Alasäiliötyypin **AO3** ala- ja yläosan keskimääräiset lämpötilat ja näistä lasketut lämpötilan muutokset ja lämpögradientti sekä alaosan maksimi lämpötila.

Tapaus		Lämpötila							
		Alaosa					Yläosa		
		$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]	ΔT_c [°C]	T_{Max} [°C]	$T_{c.is}$ [°C]	$T_{c.es}$ [°C]	$\Delta T_{c.cl}$ [°C]
Talvi	Maan päällä	32.2	21.3	6.8	11.0	39.2	47.9	39.3	23.6
	Puolittain	40.9	32.7	16.8	8.2	43.8	47.9	39.1	23.5
	Kokonaan	48.0	41.0	24.5	7.0	55.5	58.5	51.7	35.1
Kesä	Maan päällä	48.5	42.6	25.6	5.9	58.5	66.0	60.2	39.8
	Puolittain	49.6	43.2	26.4	6.4	58.8	65.9	60.1	43.0
	Kokonaan	49.7	43.7	26.7	6.0	60.5	68.4	61.8	45.1

Taulukosta 23 nähdään, että alaosan lämpögradientti on suurempi ja tasainen lämpötilan muutos pienempi puolittain maanalaisena kuin kokonaan maanalaisena talvella. Ala- ja yläosan lämpötilan muutosten erotus on suurempi kokonaan maanalaisena rakenteena. Kesällä ala- ja yläosan lämpötilan muutokset ja alaosan lämpögradientit ovat melkein samat puolittain ja kokonaan maanalaisena. Yläosan

betonikerroksen lämpötila ylittää hiukan sille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa ($\leq 65\text{ }^{\circ}\text{C}$) kesällä molemmissa tapauksissa.

Alasäiliö kuormitettiin lämmönsiirtoanalyysissa saaduilla lämpötilajakaumilla ja lepopaineella. Tutkittiin alasäiliön alaosan alapinnassa ja nurkassa sekä yläosan vyöhykkeessä 1 betonikerroksen ulkopinaan aiheutuvia vetojännityksiä. Taulukossa 24 on esitetty betonikerroksen ulkopinnoissa vallitsevat jännitykset tutkituissa kohdissa maanpäällisenä sekä puolittain että kokonaan maanalaisena rakenteena.

Taulukko 24: Yläosan vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa vaikuttavat jännitykset alasäiliötyypissä **AO3** maanpäällisenä sekä osittain että kokonaan maanalaisena rakenteena.

	Kuormitukset	Tapaus	Jännitykset		
			Yläosa	Alaosa	
			Vyöhyke1	Alapinta	Nurkka
			S.S22 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
Talvi	Lämpökuorma	Maan päällä	2.61	0.96	6.63
		Puolittain	2.56	0.99	6.61
		Kokonaan	1.95	1.19	6.53
Kesä	Lämpökuorma	Maan päällä	1.23	1.20	5.74
		Puolittain	1.23	1.25	6.32
		Kokonaan	1.04	1.25	6.92
	Maanpaine	Puolittain	-0.09	-0.03	0.02
		Kokonaan	-1.02	-0.93	0.02

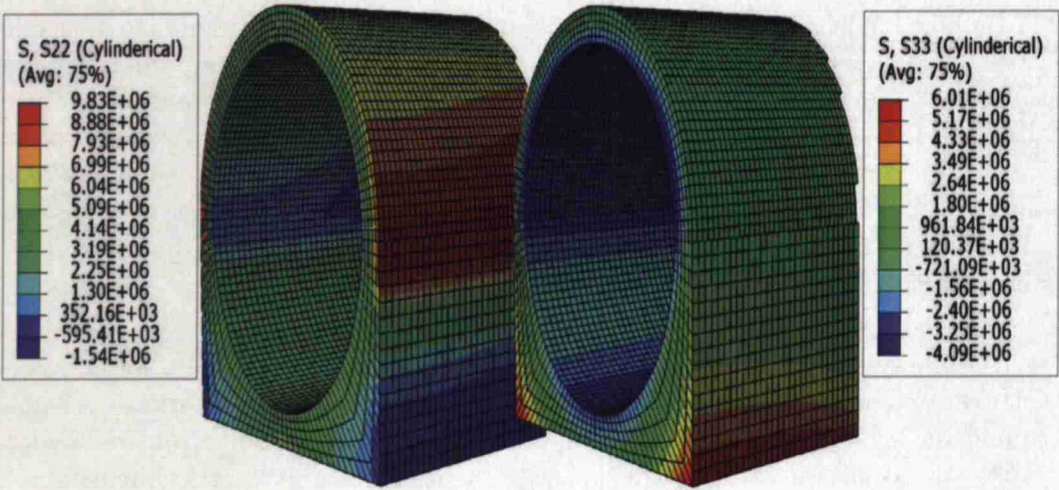
Taulukosta 24 nähdään, että lämpöjännitykset ovat suurimmillaan alasäiliön yläosan vyöhykkeessä 1 kehän suunnassa ja alaosan nurkassa pituussuunnassa talviolosuhteessa. Vastaavasti lämpöjännitykset ovat suurimmillaan alaosan alapinnassa kehän suunnassa ja nurkassa pituussuunnassa kokonaan maanalaisen alasäiliön betonikerroksessa kesäolosuhteessa. Maanpaineen aiheuttama puristusjännitys kehän suunnassa jää melko pieneksi molemmissa tapauksissa. Lämpöjännitysten kasvamisella alaosan tutkituissa kohdissa ei ole suurta vaikutusta, koska hydrostaattisen paineen vaikutus niissä kohden on pieni (kts. taulukko 20).

Alasäiliötyyppien **AS15-E** ja **AO3** betonikuoret ovat samanlaiset, joten hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat jännitykset alasäiliön betonikerroksissa ovat samat. Taulukossa 25 on esitetty optimoidun alasäiliötyypin **AO3** betonikerroksessa hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta aiheutuvat jännitykset vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa alasäiliön ollessa maanpäällisenä, osittain ja kokonaan maanalaisena rakenteena.

Taulukko 25: Alasäiliötyyppin **AO3** betonikerroksessa hydrostaattisesta paineesta ja lämpökuormasta aiheutuvat jännitykset vyöhykkeessä 1, alaosan alapinnassa ja nurkassa alasäiliön ollessa maanpäällisenä, osittain ja kokonaan maanalaisena rakenteena.

Tapaus		Jännitykset		
		Yläosa	Alaosa	
		Vyöhyke1	Alapinta	Nurkka
		S.S22 [MPa]	S.S22 [MPa]	S.S33 [MPa]
Talvi	Maan päällä	9.45	5.73	5.82
	Puolittain	9.41	5.76	5.80
	Kokonaan	8.80	6.02	5.72
Kesä	Maan päällä	8.08	5.97	4.93
	Puolittain	8.08	6.02	5.51
	Kokonaan	7.89	6.02	6.11

Taulukosta 25 nähdään, että suurimmat vetojännitykset aiheutuvat yläosan vyöhykkeeseen 1 kehän suunnassa talviolosuhteessa alasäiliön ollessa maanpäällisenä rakenteena. Suurimmat pituussuuntaiset vetojännitykset alaosan nurkassa ja kehän suuntainen vetojännitys alaosan alapinnassa esiintyvät kesäolosuhteessa kokonaan maanalaisessa säiliössä. Alasäiliön tavoiteltu betonikerroksen vetojännitys (≤ 10 MPa) saavutettiin alasäiliötyyppillä AO3. Yläosan betonikerroksen lämpötila ylittää hie-man betonille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa kesäolosuhteessa (kts. taulukko 23). Kuvassa 63 on esitetty alasäiliötyyppin **AO3** kehän suuntainen ja pituussuun-tainen jännitysjaakauma hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena kiinni-tetyn päädyn läheisyydessä.



Kuva 63: Alasäiliötyyppin bf AO3 kehän- ja pituussuuntainen jännitysjaakauma hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena kiinnitetyn päädyn läheisyydessä.

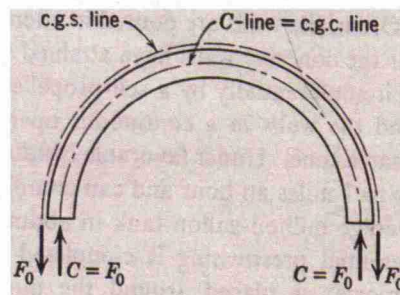
6.2.5 Alasäiliön yläosa jännitettynä rakenteena

Alasäiliön tarkasteluissa kappaleissa 6.2.3.1 ja 6.2.4 havaittiin, että alasäiliön betonirakenteeseen kohdistuu suuria vetojännityksiä, jotka on haasteellista ottaa betoniteräksillä vastaan. Havaittiin myös, että hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman suurimmat yhteiset vetojännitykset vaikuttavat alaosan ja yläosan liittymäkohdan ympäristössä. Jännitetyn betonirakenteen edellytyksenä on, että betonirakenne pysyy puristuksessa pysyvien kuormien alaisena. Jotta betonikerros on pysyvä halkeamattomassa tilassa, on alasäiliö jännitettävä.

Jännittäminen tarkoittaa pysyvän jännityksen luominen rakenteeseen ennen kuin pysyvät kuormat tai osa niistä ja muuttuvat kuormat alkavat vaikuttaa rakenteeseen. Se parantaa rakenteen ominaisuuksia niin, että betonikerroksen kestävyys paranee ottamaan pysyvät ja muuttuvat kuormat vastaan ja se sopii paremmin käyttötarkoitukseensa. [3]

6.2.5.1 Jännitetty ympyrämuotoinen sylinterirakenne

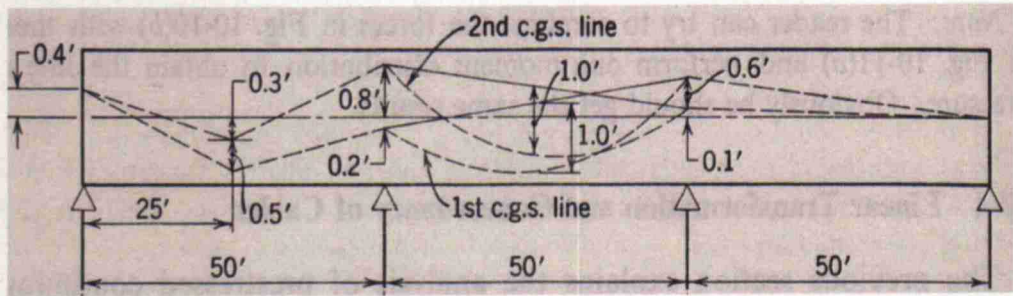
Esijännitysvoiman F_0 alaisena betonikerrokseen aiheutuu puristusresultantti C , joka on yhtä suuri kuin siihen kohdistettu jännevoima F_0 . Yleensä betonikerroksen puristusresultantti ei ole samassa linjassa kuin rakenteen painopiste. Mutta pyörähdysymmetrisesti jännitetyssä sylinterirakenteessa rakenteen painopiste ja puristusresultantti ovat aina samassa linjassa jänneteräksen paikasta huolimatta. Tämä johtuu siitä, että suljettu ympyrämuotoinen rakenne on staattisesti määräämätön, jossa lineaarisen muunnoksen periaate täyttyy. [16] Kuvassa 64 on esitetty ympyrämuotoisen sylinterin puristusvoiman resultantti epäsymmetrisesti jännitetyssä rakenteessa.



Kuva 64: Jännittämisestä aiheutuvat voimaresultantit. Kuvassa c.g.s line = jänneterästen linja, c.g.c line = rakenteen painopiste ja C-line = puristusvoiman resultantin linja. [16]

Lineaaraisella muunnoksella tarkoitetaan jatkuvassa tasapaksuisessa palkissa väli-tuella kulkevien jänneterästen paikan tai puristusresultantin paikan siirtäminen ilman jänneterästen todellisen muodon (käyristymä ja taiveet) muuttamista yksittä-

sissä kentissä. Jokaisessa jatkuvassa palkissa jänneterästen linja voidaan muuttaa lineaarisen muunnoksen periaatteen mukaisesti ilman että puristusresultantin paikka muuttuisi. Niin kauan kun puristusresultantin paikka on sama betonirakenteen jännitys jakauma pysyy samana. [16] Kuvassa 65 on esitetty jatkuvan palkin jänneteräslinjan lineaarinen muunnos, jossa palkin puristusresultantin linja pysyy samana molemmissa jännegeometrian tapauksessa.



Kuva 65: Jänneterästen linjan c.g.s lineaarinen muunnos jatkuvassa palkissa. [16]

Betonikerroksen poikkileikkauksella on suuri vaikutus betonin puristustilaan jännitetyissä rakenteissa. Mitä paksumpi betonikerros sitä pienempi puristusjännitys samalla jännevoimalla. Ympyrämuotoisen jännittämisen tarkoituksena on synnyttää rakenteeseen kehän suuntaista alkupuristusjännitystä, joka on aina aksiaalinen riippumatta esijännityksen paikasta. Tämä voidaan esittää kaavasta: [16]

$$f_c = -\frac{F}{A_c}, \quad (58)$$

missä F on esijännitysvoima jännityshäviöiden jälkeen ja A_c betonikerroksen poikkileikkauksen pinta-ala. Esijännityksestä ja sisäpuolisesta paineesta betonirakenteeseen aiheutuva jännitysresultantti voidaan laskea kaavasta:

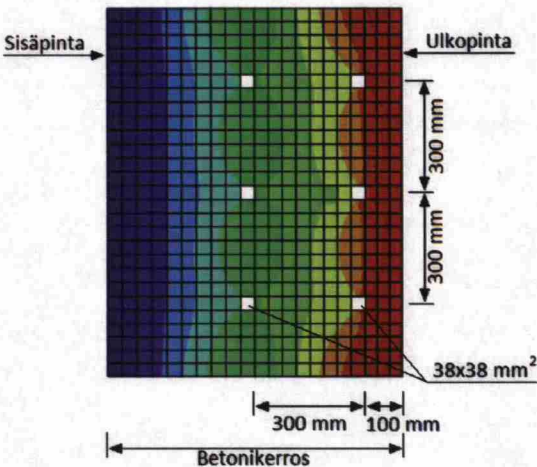
$$f_c = -\frac{F}{A_c} + \frac{pR}{A_t} \quad (59)$$

missä p = sisäpaineen tiheys, R = lieriön sisäpinnan säde, A_t = muunnettu pinta-ala = $A_c + (n - 1)A_c$ ja n on jänneterästen ja betonin kimmokertoimien suhde.

Pyörähdyssymmetrisesti jännitetyn ympyrämuotoisen säiliön betonikerroksen jännitys jakauma määritettiin aksisymmetrisellä Abaqus-mallilla. Tutkittiin neljää seinämältään eri paksuista ympyrämuotoista betonisylinteriä, joiden sisäsäde oli 5.2 metriä, joka oli sama kuin alasäiliötyypin **AO3** betonikerroksen sisäsäde. Betonikerroksen paksuudet olivat 700 mm, 800 mm, 900 ja 1000 mm.

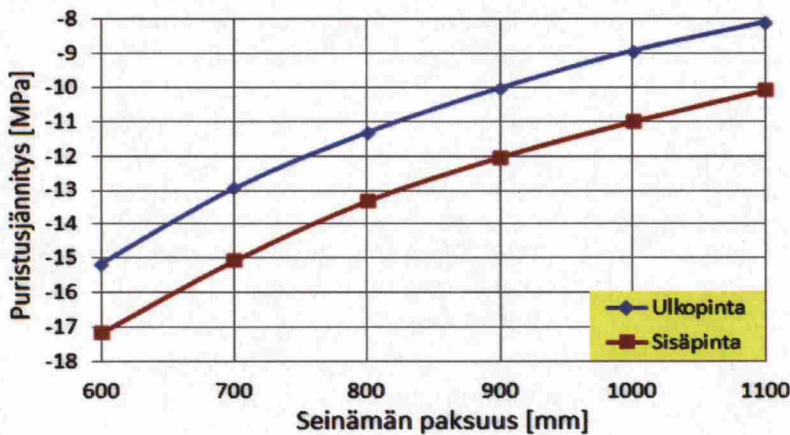
Jännepunosten poikkileikkauksena käytettiin $38 \times 38 \text{ mm}^2$. Poikkileikkaus $38 \times 38 \text{ mm}^2$ vastaa 10 kappaletta halkaisijaltaan 15.7 mm olevaa jännepunosta. Uloimmat

jännekaapelit sijoitettiin minimireunaetäisyyden (noin 100 mm) päähän ulkoreunasta. Jännekaapeleiden keskinäiseksi etäisyydeksi valittiin 300 mm. Jännekaapeleita oli kahdessa kerroksessa. Punosten esijännitys saatiin aikaiseksi asettamalla niille loppujännitys 1200 MPa. Esitutkimuksessa [15] oli selvitetty betonin muodonmuutoksen vaikutus käytettyyn alkujännitysvoimaan (noin 1700 MPa) ja todettu, että saavutettava loppujännitysvoima on 1200 MPa. Aksisymmetrisessä laskentamallissa käytetyt jännepunosten ominaisuudet on esitetty taulukossa 12. Mallissa käytetyn betonin ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Jännekaapeleiden poikkileikkaukset ja paikat on esitetty kuvassa 66.



Kuva 66: Jännekaapeleiden poikkileikkaukset ja sijainnit betonirakenteessa.

Kuvassa 67 on esitetty lieriömäisen sisäsäteeltään 5.2 m olevan betonirakenteen sisä- ja ulkopinnan puristusjännitys paksuuden kasvaessa saman jännevoiman alaisena.



Kuva 67: Betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan puristusjännitys betonirakenteen paksuuden muuttuessa samansuuruisen jännevoiman alaisena.

Kuvasta 67 nähdään, että saman suuruisen jännevoiman aiheuttama puristusjännitys lieriön betonirakenteen sisä- ja ulkopinnassa ei muutu lineaarisesti rakenteen paksuuden muuttuessa.

6.2.5.2 Alasäiliötyypin AO3 yläosa jännitettynä rakenteena

Alasäiliön rakennekerrosten ja rakennepaksuuksien optimoinnin tavoitteena oli määrittää alasäiliön rakenneratkaisut niin, että betonikerroksen vetojännitykset pysyvät alle 10 MPa hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena. Tämän tavoitteen saavutettiin alasäiliötyypillä **AO3**, jonka ala- ja yläosan sisäpinnan lämmöneristeet olivat erilaiset. Sen poikkileikkaus ja rakenneratkaisut on esitetty kuvassa 94. Alasäiliötyypin **AO3** osien rakennekerrokset ovat sisältä ulospäin seuraavasti:

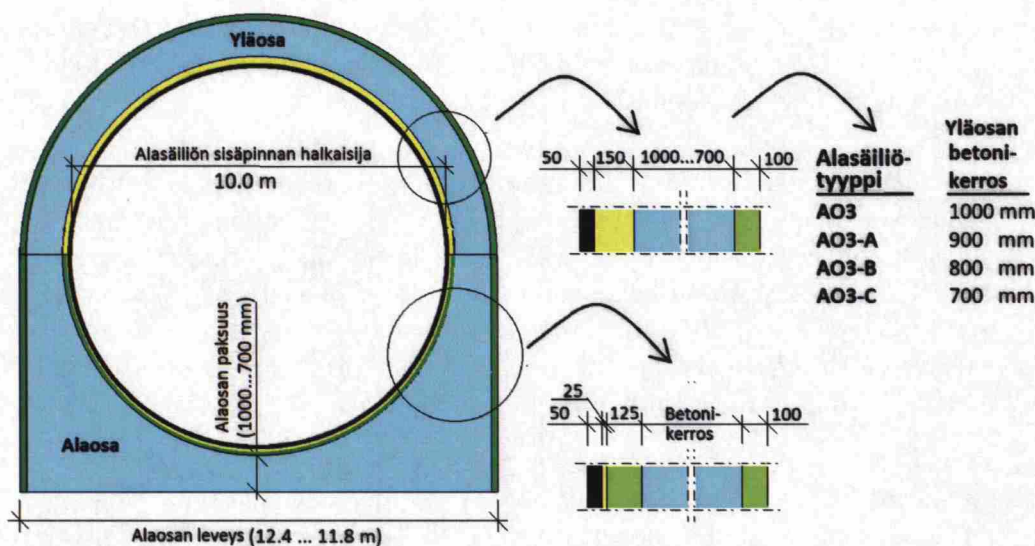
- **Yläosa:** lujitemuovi(50 mm) + mineraalivilla (150 mm) + betoni (1000 mm) + polyuretaani (100 mm)
- **Alaosa:** lujitemuovi(50 mm) + mineraalivilla (25 mm) + polyuretaani (125 mm) + betoni (muuttuva) + polyuretaani (100 mm)

Hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman aiheuttamat vetojännitykset ovat suurimmillaan kehän suunnassa alasäiliön yläosassa sekä ala- ja yläosan liittymän ympäristössä. Koska yläosa on rakenteeltaan tasapaksu puolisympyrä, niin siihen sovellettiin pyörähdyssymmetrisesti jännitetyn lieriön periaatetta, minkä tavoitteena oli tarkastella yläosan betonikerroksen jännitystilaa jännitettynä rakenteena. Tarkasteltiin yläosaa jännitettynä rakenteena ainoastaan kehän suunnassa.

Alasäiliötyypin AO3 betonikerroksen paksuuden optimointi

Kuvasta 54 nähdään, että betonikerroksen paksuuden kasvattaminen pienentää vain vähän hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhteisvaikutuksesta aiheutuvia vetojännityksiä yläosan betonikerroksessa vyöhykkeessä 1. Kuvasta 67 nähdään, että jännevoiman aiheuttama puristusjännitys pienenee pyörähdyssymmetrisen lieriön betonikerroksen ulkopinnassa seinämän paksuuden kasvaessa. Näitä kuvia verratessa havaitaan, että jännevoiman aiheuttaman puristusjännityksen pienennys (kts. kuva 67) on suurempi kuin kumottu vetojännitys betonikerroksen kasvaessa. Tämän takia yläosan betonikerroksen paksuutta optimoitiin jännitettynä rakenteena.

Alasäiliötyypistä **AO3** kehitettiin kolme muuta tyyppiä pienentämällä yläosan betonikerroksen ja alaosan paksuutta pykälän 100 mm. Kolme uutta alasäiliötyyppiä olivat: **AO3-A**, **AO3-B** ja **AO3-C** (kts. kuva 68). Alasäiliötyypit tutkittiin maanpäällisinä rakenteina talviolosuhteissa. Lämmönsiirto analyysissä ja lujuusanalyysissä käytettiin kuvien 47 ja 49 mukaisia reunaehdoita.



Kuva 68: Alasäiliötyypit AO3...AO3-C mittoineen. Rakennekerrokset on havainnollistettu värein: musta = lujitemuovi, keltainen = mineraalivilla, sininen = betoni ja vihreä = polyuretaani.

Alasäiliötyypit kuormitettiin hydrostaattisella paineella ja lämmönsiirtoana- llyseista saaduilla lämpökuormilla. Taulukossa 26 on esitetty hydrostaattisesta paineesta, lämpökuormasta ja näiden yhteisestä vaikutuksesta aiheutuvat vetojännitykset kehän suunnassa betonikerroksen ulkopinnassa yläosan vyöhykkeessä 1. Taulukossa on myös esitetty jännevoiman aiheuttama puristusjännitys yläosan paksuisen lieriön ulkopinnassa ja yläosan betonikerroksen jännitystila vyöhykkeessä 1 jännitettynä rakenteena (kts. kuva 67).

Taulukko 26: Hydrostaattisesta paineesta, lämpökuormasta ja jännevoimasta sekä näiden yhteisvaikutuksesta aiheutuvat jännitykset betonikerroksen ulkopinnassa yläosan vyöhykkeessä 1.

JÄNNITYSJAKAUMAT [MPa]						
Alasäiliö	Betonin paksuus	Lämpökuorma	Hydros. paine	Yhteinen	Jännevoima	Yhteinen + Esijännitys
AO3	1000 mm	+2.67	+6.78	+9.45	-8.92	+0.53
AO3-A	900 mm	+2.25	+7.55	+9.80	-10.01	-0.21
AO3-B	800 mm	+2.21	+8.65	+10.86	-11.32	-0.46
AO3-C	700 mm	+2.04	+9.93	+11.92	-12.93	-1.01

Taulukosta 26 nähdään, että mitä ohuempi betonikerroksen paksuus on sitä pienempi on lämpöjännitys ja sitä suurempaan puristustilaan betonikerroksen ulkopinta pääsee jännitettynä rakenteena.

Lisäksi alasäiliötyyppi optimoitiin betonikerroksen korkeimman lämpötilan suhteen. Taulukosta 23 nähdään, että korkeimmat lämpötilat aiheutuvat kokonaan maanalaisen alasäiliön betonikerroksessa. Tästä syystä alasäiliön optimointi korkeimman lämpötilan suhteen tehtiin kokonaan maanalaisessa alasäiliössä. Lämmönsiirto analyysissa käytettiin kuvan 50 mukaisia reunaehtoja. Taulukossa on esitetty ala- ja yläosan betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan keskimääräiset lämpötilat ja lisäksi alaosan betonikerroksen maksimi lämpötila.

Taulukko 27: Ala- ja yläosan betonikerroksen pintojen keskimääräiset lämpötilat sekä alaosan maksimi lämpötila alasäiliön ollessa kokonaan maanalaisena kesäolosuhteessa.

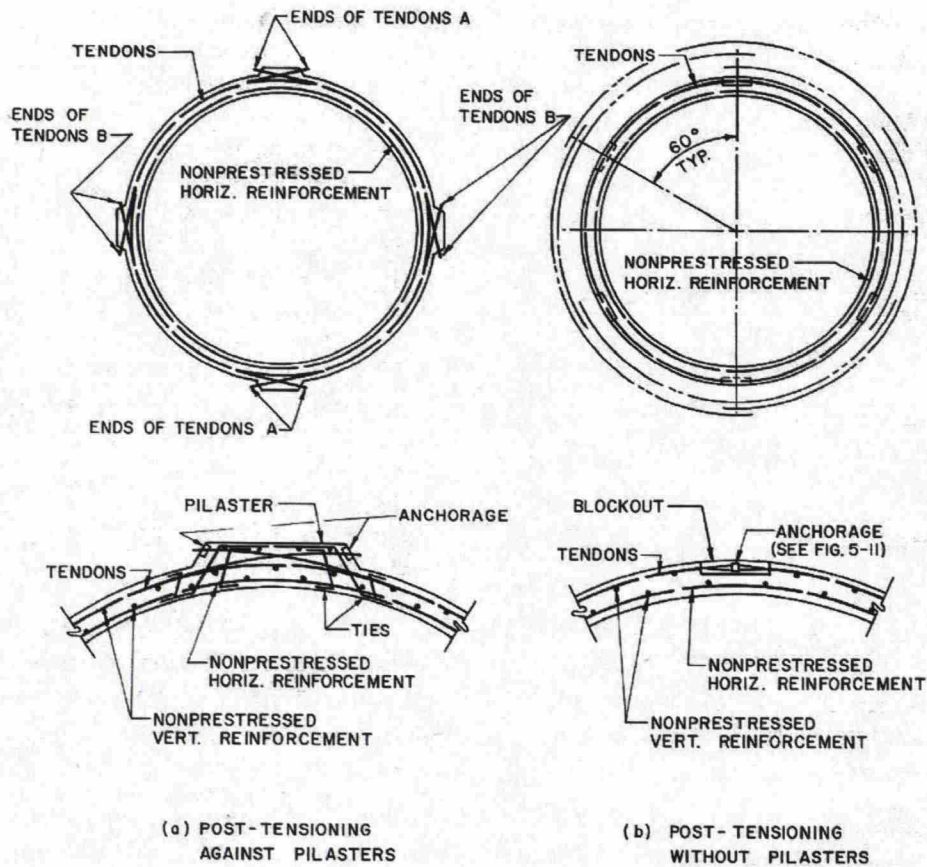
Alasäiliö- tyyppi	Lämpötilat				
	Alaosa			Yläosa	
	Sisäpinta	Ulkopinta	Max	Sisäpinta	Ulkopinta
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
AO3	49.7	44.7	60.5	68.4	63.1
AO3-A	49.8	44.8	60.6	68.2	63.4
AO3-B	49.8	45.3	60.9	68.4	63.2
AO3-C	49.7	45.8	61.2	67.1	62.3

Taulukosta 27 nähdään, että yläosan betonikerroksen lämpötila ylittää hiukan suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa, mutta alaosan betonikerros pysyy kaikissa alasäiliötyypeissä suositellussa lämpötilassa. Taulukoista 26 ja 27 havaitaan, että alasäiliötyypin **AO3-C** betonikerrokseen aiheutuu suurempi puristusjännitys ja alhaisempi lämpötila kuin muissa alasäiliötyypeissa, joten se on optimoitu alasäiliötyyppi.

VSL-ankkurijännemenetelmä alasäiliötyypissä AO3-C

Pyöreissä säiliöissä, jotka jännitetään sisäisillä jänteillä, on varottava jänteiden leikkautumista sisäpuolisen betonipeitteen läpi. Yleensä tämä vältetään sijoittamalla vaakasuuntaisten kaapeleiden teoreettinen painopiste seinän ulomman kolmanneksen alueelle. [?]

Pyöreää kuorta jännitettäessä ankkureita on oltava vähintään 4 kpl ja ne voidaan asentaa joko pilasteriin tai syvennykseen. Kuvassa 69 on esitetty näitä kahta periaatetta ankkurien sijoitteluun. [20]



Kuva 69: Ankkurijännetekniikka. [20]

Kuvassa 66 esitetyt jännekaapelit tarvitsevat poikkileikkaukseltaan $250 \times 250 \text{ mm}^2$ olevia jänneankkureita VSL-ankkurijärjestelmässä (kts. taulukko 28). Kuvasta 69 voidaan päätellä, että kahden kerroksen jännekaapelin ankkurointi säiliössä saattaa osoittautua vaikeaksi ja monimutkaiseksi toteuttaa jännekaappeleiden teoreettisen painopisteen pysyessä betonikerroksen ulomman kolmanneksen alueella. Tästä syystä alasäiliötyypin **AO3-C** yläosaa tarkasteltiin yksikerroksisilla jännekaapeleilla.

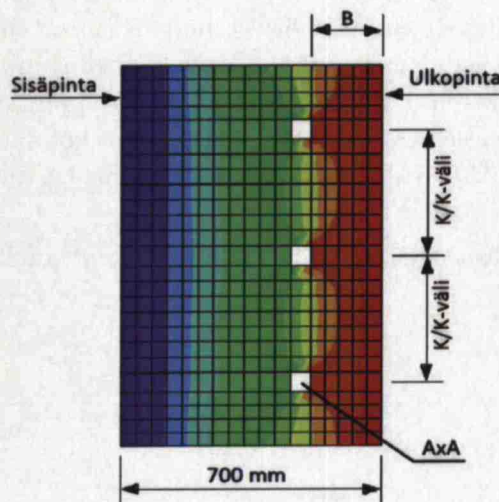
Taulukossa 28 on esitetty osa VSL-ankkurijännemenetelmää liitteestä 7.

Taulukko 28: VSL-ankkurijännemenetelmä

Punoksia lukumäärä kpl	Suojaputken sisähalkaisija [mm]	Jänteen epäkesk. kaarevilla osilla [mm]	Ankkurien mitat betoni $\geq f_{cmi}$ [mm ²]	Ankkurin reuna-etäisyys [mm]	Ankkurien k/k-väli [mm]
9	55	9	250 x 250	150	250
10	60	10	250 x 250	150	250
15	70	11	300 x 300	175	305
17	75	12	300 x 300	175	320
19	80	13	300 x 300	175	345
20	80	13	330 x 330	190	345
21	85	13	330 x 330	190	360
22	85	13	330 x 330	190	370

Lineaarisen muunnoksen ansiosta jänneterästen sijainnin muutos pyörähdyssymmetrisessä rakenteessa ei vaikuta betonikerroksen jännitystilaan. Jotta betonikerros saadaan vähintään samaan puristustilaan kuin taulukossa 26, on punosten lukumäärän oltava vähintään 20 kpl yhdessä jännekaapelissa 300 mm jaolla.

Tutkittiin alasäiliötyyppiä **AO3-C** taulukon 28 kolmessa viimeisessä ankkurijännetaipauksessa, joissa punosten lukumäärä oli vähintään 20 kpl. Mallinnuksessa jännepunokset mallinnettiin neliönä, jonka pinta-ala vastasi jännepunosten määrän yhteistä pinta-ala yhdessä jännekaapelissa. Kuvassa 70 on esitetty periaatekuva aksisymmetrisestä Abaqus-mallista jännekaapelin pinta-ala ja niiden keskinäinen väli symbolein esitettynä.



Kuva 70: Jännekaapeleiden paikat ja pinta-alat pyörähdyssymmetrisesti jännitetyssä betonirakenteisessa lieriössä.

Taulukossa 29 on esitetty kuvassa 70 esitettyjen symbolien arvot ja jänne- punosten aiheuttamat puristusjännitykset 700 mm paksuisen betonikerroksen sisä- ja ulkopinnassa pyörähdyssymmetrisessä lieriössä. Esijännityksenä käytettiin 1200 MPa.

Taulukko 29: VSL-ankkurijännemenetelmän jännekaapelin pinta-ala, jännekaapeleiden keskinäinen välietäisyys ja niiden aiheuttama puristusjännitys kehän suunnassa 700 (S22) mm paksun pyörähdyssymmetrisesti jännitetyn betoni-rakenteisen lieriön ulko- ja sisäpinnassa.

Punoksia kpl	Pinta-ala AxA [mm ²]	Betonipeite B [mm]	k/k-väli [mm]	Jännitykset S22	
				ulkopinta [MPa]	sisäpinta [MPa]
20	54x54	120	350	-12.39	-14.49
21	56x56	120	360	-12.91	-15.12
22	57x57	120	370	-13.00	-15.23

Taulukossa 29 esitettyjä VSL-ankkurijärjestelmän aiheuttamia puristusjännityksiä ja taulukon 26 alasäiliötyypin **AO3-C** hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhteisiä vetojännityksiä ulkopinnassa vertailtaessa huomataan, että kaikki kolme jännittämistapaa pitävät alasäiliön yläosan puristuksessa. Koska alaosan betonikerroksen paksuus muuttuu alaspäin mentäessä, eikä se ole enää tasapaksuinen puolimpyrä taulukon 29 arvoja ei voida soveltaa alaosassa.

Kuormitusten aiheuttama jännitys jakauma alasäiliötyypissä AO3-C

Aiemmin tehdyt alasäiliön rakenneratkaisujen optimoinnit jännitysten suhteen tehtiin pääosin alasäiliön yläosan vyöhykkeessä 1. Hydrostaattinen paine ja lämpökuorma aiheuttavat kumpikin vetojännityksiä betonikerroksen ulkopintaan vyöhykkeessä 1. Mutta joissakin alasäiliön kohdissa lämpökuorma ja hydrostaattinen paine pienentävät tai kumoavat toistensa aiheuttamia vetojännityksiä.

Koska hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman vaikutukset voivat olla toisistaan riippumattomia reaktoritornin nopean täytön ja tyhjennyksen ansiosta, niin kehän suuntaista jännitys jakaumaa tutkittiin alasäiliössä kummankin kuormituksen alaisena erikseen ja yhteen. Kuvassa 71 on esitetty betonikerroksen kehän suuntaisia jännitys jakaumia alasäiliössä hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman alaisena erikseen.



Kuva 71: Alasäiliötyypin AO3-C jännitys jakauma [Pa] betonikerroksen kehän suunnassa hydrostaattisen paineen (vasemmalla) ja lämpökuorman (oikealla) alaisena.

Kuvasta 71 nähdään, että hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat vetojännitykset ovat suurimmillaan betonikerroksen ulkopinnassa yläosan vyöhykkeessä 1 ja sisäpinnassa vyöhykkeessä 3. Vastaavasti lämpökuormasta aiheutuvat vetojännitykset ovat suurimmillaan alaosan ulkopinnassa ala- ja yläosan liittymäpäiden läheisyydessä. Nämä vetojännitykset ovat pienempiä kuin taulukossa 29 esitetyt puristusjännitykset. Kuvasta 71 myös nähdään, että hydrostaattinen paine ja lämpökuorma kumoavat osan toistensa aiheuttamia vetojännityksiä joissakin kohdissa alasäiliötä mm. ala- ja yläosan sisäpinnoissa. Alaosan sisäpintaan aiheutuu suuria vetojännityksiä hydrostaattisesta paineesta, mutta silti ne ovat pienempiä kuin 10 MPa, mikä oli tavoitteena alustavissa tarkasteluissa.

Tarkasteltiin myös jännitys jakauma kehän suunnassa hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhteisvaikutuksesta. Kuvasta 72 nähdään, että suurimmat vetojännitykset keskittyvät yläosan vyöhykkeeseen 1 sekä ala- ja yläosan liittymäpäiden ympäristöön. Nämä vetojännitykset voidaan kumota jännevoimalla (taulukko 29).



Kuva 72: Alasäiliötyypin AO3-C jännitys jakauma [Pa] kehän suunnassa hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhteisvaikutuksen alaisena.

Reaktoritornin varren tarkastelussa kappaleessa 5 optimoidun rakennetyypin **RT3-A2** betonikerroksen lämpötila alittaa betonille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa. Saatiin selville, että juurestaan jäykästi kiinnitettynä rakenteena varren betonikerroksen ulkopintaan aiheutuu suuria vetojännityksiä talviolosuhteessa tapauksessa, jossa reaktoritorni on poissa käytöstä ja betonikerroksen lämpötila on sama kuin ulkoilman ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Juurestaan vapaasti kiinnitettynä varren betonikerrokseen aiheutuu pieniä voimasuureita. Alasäiliön muoto ja rakenneratkaisut kaukana alasäiliön ja varren liitoksesta optimoitiin kappaleessa 6.2. Optimoidun **AO3-C** alasäiliötyypin betonikerroksen lämpötila ylittää vain hieman betonille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa ja vetojännitykset yläosassa voidaan kumota jännevoimalla. Yhdistämällä varren rakennetyypin **RT3-A2** ja alasäiliötyypin **AO3-C** saadaan alasäiliön ja varren liitos, jonka tarkastelu on vaikeampi ja monimutkaisempi kuin varren ja alasäiliön tarkastelu erillisinä rakenteina.

7 ALASÄILIÖN JA VARREN LIITOS

Reaktoritornin varren juuren tuennassa tehtiin kappaleessa 5 yksinkertaistuksia alustavissa tarkasteluissa. Varren juuren reunaehdot olivat pyörähdyssymmetrisiä joko jäykästi tai vapaasti tuettua. Pyörähdyssymmetristen kuormien ollessa kyseessä, voimasuureet ja näistä aiheutuvat jännitykset on helposti ratkaistavissa analyytisesti. Todellisuudessa reaktoritornin varsi tukeutuu kohtisuoraan makaavaan sisäpuoleltaan lieriömäiseen putkeen ja ne muodostavat sylinteri-sylinteri-liitoksen. Tässä tapauksessa reunaehdot eivät ole pyörähdyssymmetrisiä eikä yksinkertaisia reunaehdoja (vapaasti tai jäykästi tuettu) voida soveltaa tähän.

Alasäiliön muodon määrittelyssä kappaleessa 6.1 huomattiin, että hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat suurimmat vetojännitykset vaikuttavat alasäiliön ja varren liitoksen läheisyydessä jäykän alasäiliön tapauksessa (kts. kuva 44). Tässä kappaleessa tutkittiin alasäiliön ja varren liitosta tarkemmin tutkimalla eri kuormien vaikutuksia liitokseen ja liitoksen vahventamista betonilla ja teräsruuvilla pienentämään vetojännityksiä betonirakenteessa. Liitosta tutkittiin myös teräksisenä rakenteena. Liitoksen tarkastelussa alasäiliönä käytettiin alasäiliötyyppejä **AO3-C** ja varteena rakennetyyppejä **RT3-A2**.

Sylinterirakenteiden liitoksen suunnittelu ja jännitysanalyysi on käynyt tärkeäksi osa-alueeksi rakenteiden suunnittelussa. Paineastiat, kuumavesisäiliöt ja ydinvoimalan reaktorin osat ovat tyypillisiä esimerkkejä sylinteri-sylinteri-liitoksista. Paineastian rakenteen geometrian muuttuminen liitoksessa aiheuttaa korkeat jännitysjakaumat liitoksessa ja sen ympärille vähentäen astian seinämän kapasiteettia kestäämään sille suunniteltua sisäpainetta. Paineastian kapasiteettia voidaan parantaa vahventamalla rakennetta reiän ympäriltä. [6]

Liitosalueen jännitysjakauman analyttinen ratkaisu on melkein mahdotonta, koska liitoksen kaaren muoto on monimutkainen. Kun sylintereiden säteiden mit-

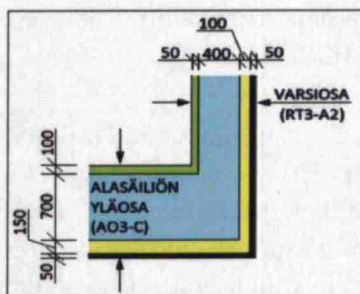
tojen suhde on pieni jonkinlainen analyttinen ratkaisu voidaan tehdä tekemällä joitakin rajoituksia. Nämä rajoitukset aiheuttavat epätarkkuutta ratkaisuun. Sylindereiden säteiden suhteen ollessa suurempi kuin $1/3$ nämä epätarkkuudet kasvavat niin suuriksi, että ne kannattaa ottaa suunnittelussa ja mitoituksessa huomioon. [6] Reaktoritornin alasäiliön ja varren sisäsäteiden suhde on $6/10$, joten analyttista ratkaisua ei voida käyttää.

Liitokseen vaikuttavat kaikki luvussa 4.1 mainitut kuormitukset joko suoraan tai liitososien kautta. Kuormat voivat vaikuttaa reaktoritorniin yhtä aikaa tai eri aikaa. Reaktoritornin omapaino on aina vaikuttamassa huolimatta muista kuormista. Hydrostaattinen paine ja lämpökuorma rasittavat reaktoritornia samaan aikaan mutta voivat myös vaikuttaa toisistaan riippumatta nopean täytön tai tyhjennyksen ansiosta. Muut hyötykuormat, lumikuorma ja tuulikuorma voivat rasittaa reaktoritornia milloin tahansa.

7.1 Eri kuormien vaikutukset liitokseen

Reaktoritornin liitoksen tarkastelussa käytettiin 3D-mallia. Koko reaktoritorni yläsäiliötä lukuunottamatta mallinnettiin. Yläosan kautta välittyvät kuormat mallinnettiin varren yläpäähän. Alasäiliöksi mallinnettiin 25 metriä pitkä alasäiliötyyppi **AO3-C** ja kohtisuoraan sen keskelle rakennetyypiltään **RT3-A2** 42 metriä korkea varsi. Alasäiliön ja varren liitokseen tehtiin reikä, jonka halkaisija oli yhtä suuri kuin varren sisähalkaisija.

Lämmönsiirtoanalyysissä oli pidettävä huolta siitä, että molempien osien rakennekerrokset olivat jatkuvia liitoksessa. Yksinkertaistuksen vuoksi alustavassa mallinnuksessa liitoksen sisäkulman pyöristystä ei huomioitu. Kuvassa 73 nähdään 2-ulotteista kuvaa alasäiliön ja varren liitoksesta ja rakennekerrosten jatkuvuutta osien välillä ilman pyöristystä.

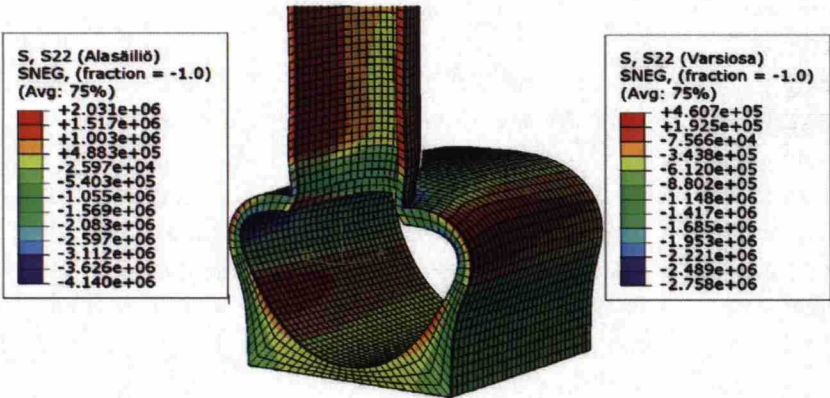


Kuva 73: Alasäiliön ja varren liitos. Rakennekerrokset värein havainnollistettu on sisältä ulospäin seuraavasti: musta = lujitemuovi, keltainen = mineraalivilla, sininen = betoni ja vihreä = polyuretaani.

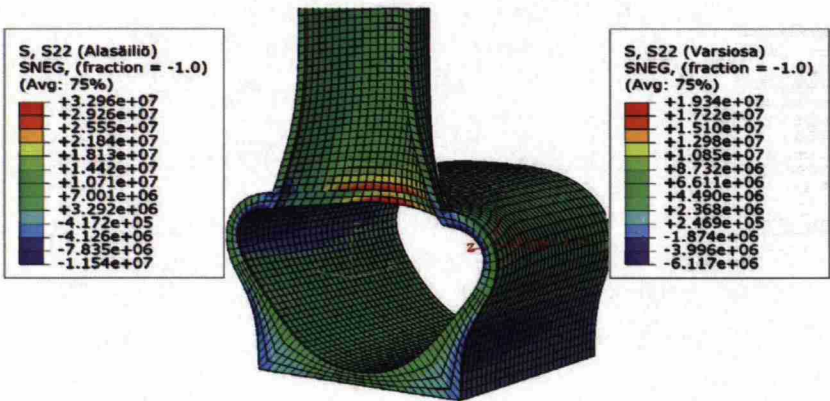
7.1.1 Mekaanisten kuormien vaikutukset

Mallinnettiin reaktoritorniin kappaleessa 4.1 mainittuja mekaanisia kuormia maanpaine lukuunottamatta. Hydrostaattisen paineen aiheuttavan lietteen yläpinnan korkeus oli 65 metriä alasäiliön pituusakselista. Lietteen tiheytenä käytettiin 1500 kg/m^3 . Tuulikuorman oletettiin kohdistuvan ainoastaan reaktoritornin yläsäiliöön ja varteen. Tuulen puuskan suunta oli alasäiliön pituussuunnassa. Kummankin kuorman vaikutus jännitysjaakumaan tarkasteltiin erikseen. Taulukossa 4 on esitetty reaktoritorniin vaikuttavia mekaanisia kuormia.

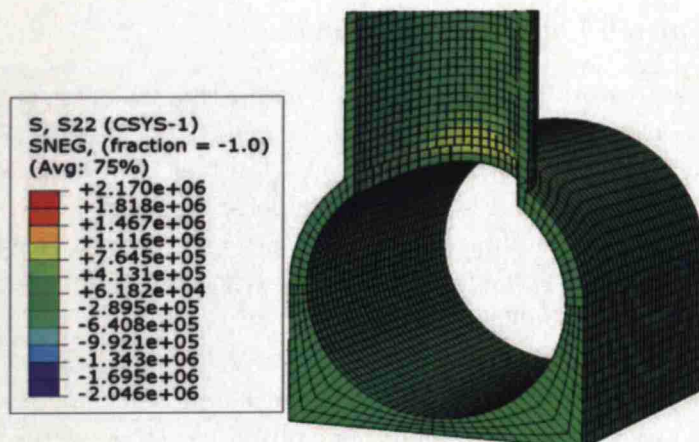
Lujuusanalyysissa käytettiin kuvan 39 mukaisia reunaehtoja, jossa alasäiliön molempien päätyjen siirtymät pituussuuntaan olivat estettyjä. Kuvissa 74 ... 76 on esitetty mekaanisista ominaiskuormista (omapaino, hydrostaattinen paine ja tuulikuorma) aiheutuvat jännitysjaakumat kehän suunnassa alasäiliössä ja varressa.



Kuva 74: Omasta painosta aiheutuva jännitysjaakuma betonikerroksessa kehän suunnassa S.S22 [Pa] alasäiliössä ja varressa.



Kuva 75: Hydrostaattisesta paineesta ja lietteen painosta aiheutuva jännitysjaakuma betonikerroksessa kehän suunnassa S.S22 [Pa] alasäiliössä ja varressa.



Kuva 76: Tuulikuormasta aiheutuva jännitysjaakuma betonikerroksessa kehän suunnassa S.S22 [Pa] alasäiliössä ja varressa.

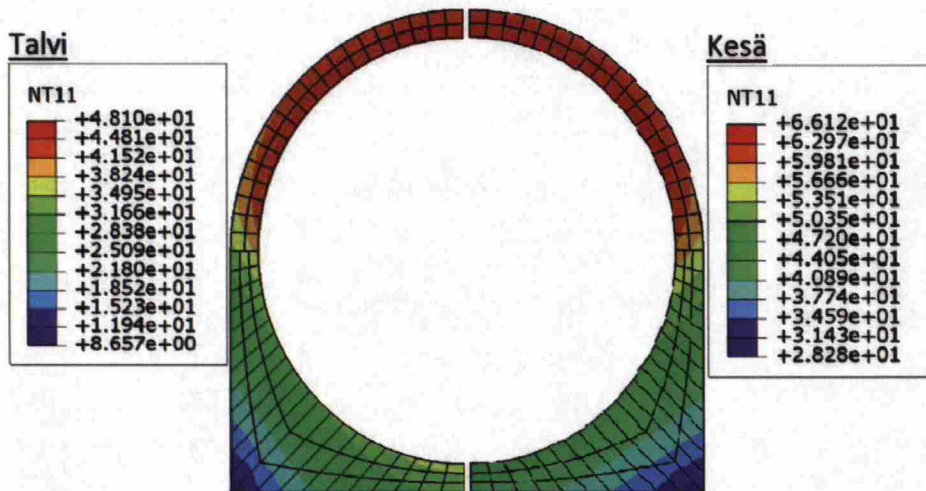
Kuvasta 74 nähdään, että reaktoritornin oma paino rasittaa eniten alasäiliön yläosan vyöhykettä 1 reiän läheisyydessä, mutta sen vaikutus reiän pielessä ja varressa on mitättömän pieni. Kuten kuvasta 76 nähdään tuulikuormastakin aiheutuu vain pieniä vetojännityksiä alasäiliössä ja varressa kehän suunnassa betonikerroksen ulkopintaan reiän läheisyydessä tuulen puolelle. Tuulikuorman vaikutus reiän pielten sisäpinnassa on mitättömän pieni. Mutta hydrostaattinen paine aiheuttaa huomattavan suuria vetojännityksiä kehän suunnassa sekä alasäiliössä että varressa. Se rasittaa eniten osien sisäpintoja reiän pielessä kuten kuvassa 75 nähdään.

7.1.2 Lämpökuorman vaikutukset

Lämpökuorman vaikutuksen tarkastelussa oli tehtävä kahta erillistä mallinnusta lämmönsiirtoanalyysia ja lujuusanalyysia varten. Lämmönsiirtoanalyysissa saatiin betonirakenteeseen aiheutuva lämpötilajakauma. Tätä lämpötilajakaumaa käytettiin reaktoritornin betonikuoren kuormana lujuusanalyysissa selvittämään siitä aiheutuvia lämpöjännityksiä.

7.1.2.1 Lämmönsiirtoanalyysi ja alasäiliön lämpötila- jakauma

Kappaleessa 6.2.4 huomataan, että alasäiliön yläosan betonirakenteeseen aiheutuu suurempia lämpöjännityksiä maanpäällisenä kuin maanalaisena. Tästä syystä alasäiliön ja varren liitosta tutkittiin reaktoritornin ollessa maanpäällisenä rakenteena, jolloin lämmönsiirtoanalyysissa käytettiin kuvan 49 mukaisia reunaehtoja. Kuvassa 77 nähdään alasäiliötyypin AO3-C lämpötilajakauma maanpäällisenä rakenteena talvi- ja kesäolosuhteessa kaukana liitoksesta.



Kuva 77: Alasäiliötyypin AO3-C lämpötilajakauma maanpäällisenä rakenteena sekä talvi- että kesäolosuhteessa käyttäen kuvan 49 reunaehtoja.

Kuvasta 77 nähdään, että alasäiliön lämpötila betonikerroksessa on korkeampi kesällä, mutta lämpötilaero betonikerroksen pintojen välillä on hieman pienempi kuin talvella kaukana liitoksesta.

7.1.2.2 Lujuusanalyysin reunaehdotapaukset lämpökuorman tarkastelussa

Alasäiliön alapinta oletetaan laakeroiduksi sekä sivusuunnassa että pituussuunnassa. Alasäiliön laajeneminen vaakatasossa on vapaa. Alasäiliö oletettiin jatkuvaksi ja tämä oli huomioitava lujuusanalyysissä. Jatkuvuuden takia reunaehtojen edellytyksenä oli se, että alasäiliön päädyt pysyivät pystysuorina tasoina myös muodonmuutosten jälkeen. Myös tutkittiin lämpöjännityksiä tapauksessa jolloin alasäiliön toinen pääty oli vapaa.

Liitoksen lujuusanalyysissä lämpökuorman suhteen alasäiliön päätyjen reunaehtojen määrittely oli haasteellista. Lämpölaajenemisen oletettiin tapahtuvan vapaasti sivusuunnassa. Pituussuuntaisen lämpölaajenemisen suhteen käytettiin kolmea eri reunaehdotapausta alasäiliön päädyissä. Näitä olivat:

- **Reunaehdotaus 1 (RE1):** siirtymät molemmissa päädyissä ovat estettyjä pituussuunnassa.
- **Reunaehdotaus 2 (RE2):** alasäiliön päätyjen pituussuuntainen liikkeet Δl ovat:

$$\Delta l = \alpha_c \Delta T_{kesk} l / 2, \quad (60)$$

missä α_c on betonin lämpölaajenemiskerroin, ΔT_{kesk} on alasäiliön keskimääräinen

lämpötilan muutos kaukana liitoksesta ja l on alasäiliön pituus. Keskimääräisellä lämpötilan muutoksella tarkoitetaan alasäiliön korkeammasta ja matalimmasta lämpötilasta lasketun keskimääräisen lämpötilan ja alkulämpötilan erotus. Alkulämpötilaksi oletettiin 20°C.

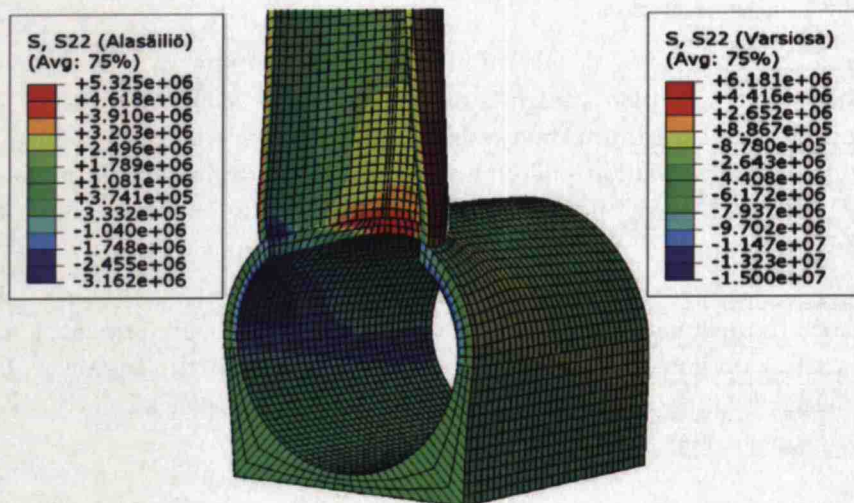
- **Reunaehtotapaus 3 (RE3):** toisessa päädyssä siirtymät ovat estettyjä pituussuunnassa ja toisessa päädyssä ne ovat täysin vapaita.

7.1.2.3 Lämpöjännitysten tarkastelu liitoksessa

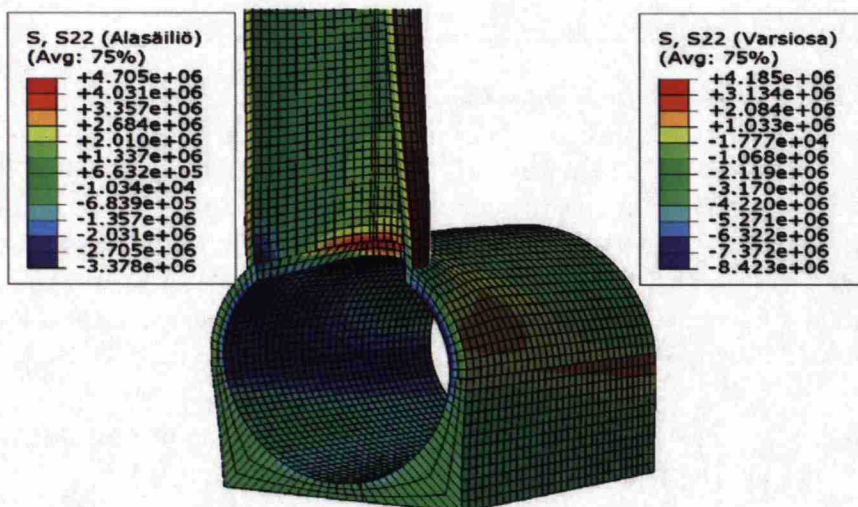
Lämpöjännitysten tarkastelu liitoksessa tehtiin maanpäällisenä rakenteena reunaehtotapauksissa **RE1**, **RE2** ja **RE3** talvi- ja kesäolosuhteissa. Kaikissa reunaehtotapauksissa lämpötilajakauma reaktoritornissa on sama samoissa olosuhteissa. Betonikerroksen lämpöjännityksiä tarkasteltiin vain kehän suunnassa.

Lämpöjännitykset talviolosuhteissa kehän suunnassa

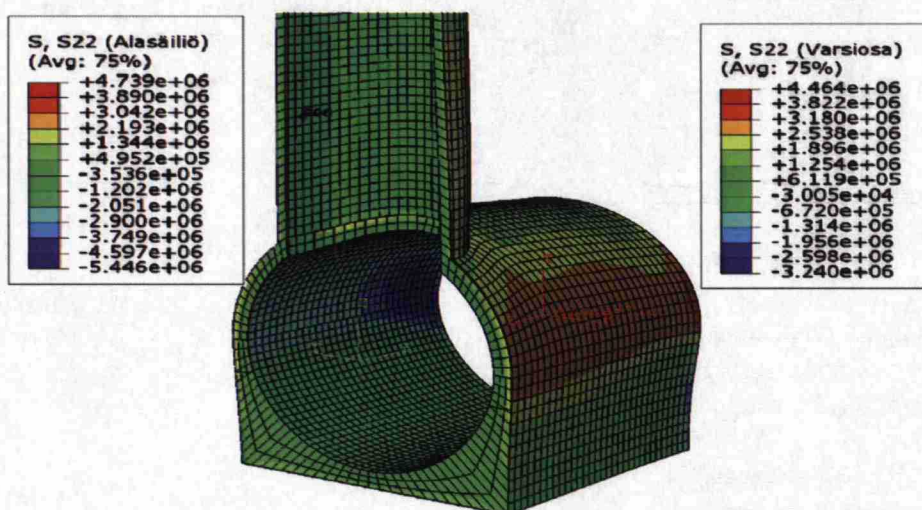
Lämpöjännitysten tarkastelu tehtiin kehän suunnassa talviolosuhteissa reunaehtotapauksissa **RE1** **RE3**. Näiden tarkastelujen tuloksista myös pystyttiin päättämään lämpöjännitysten käyttäytymistä kesäolosuhteissa. Kuvissa 78, 79 ja 80 on esitetty lämpökuormasta aiheutuvia jännitysjakautumia kehän suunnassa reaktoritornin liitoksessa ja sen ympäristössä reunaehtotapauksissa **RE1** **RE3** talviolosuhteissa.



Kuva 78: Reaktoritornin betonikerroksen jännitysjakautuma kehän suunnassa lämpökuormasta reunaehtotapauksessa **RE1**.



Kuva 79: Reaktoritornin betonikerroksen jännitysjauma kehän suunnassa lämpökuormasta reunaehtotapauksessa **RE2**.



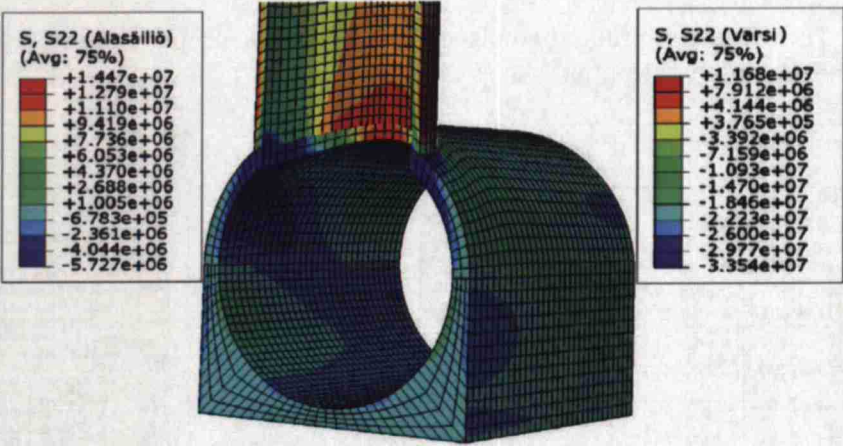
Kuva 80: Reaktoritornin betonikerroksen jännitysjauma kehän suunnassa lämpökuormasta reunaehtotapauksessa **RE3**.

Kuvista 78 ... 80 voidaan nähdä, että alasäiliön päädyn reunaehtotapauksilla on merkittävä vaikutus jännitysjaumaan liitoksessa ja sen ympäristössä. Alasäiliön pituussuuntaisen lämpölaajenemisen estäminen pakottaa reiän soikkion muotoon ja täten reiän pieliin ja varren juureen aiheutuu suuria vetojännityksiä (kts. kuva 78). Mitä enemmän lämpölaajenemista estetään sitä suurempia lämpöjännityksiä reiän pieleen aiheutuu (vrt. kuvat 78 ja 79). Alasäiliön toisen päädyn täysin vapauttaminen pienentää lämpöjännityksiä liitoksessa melkein mitättömiksi (kts. kuva 80).

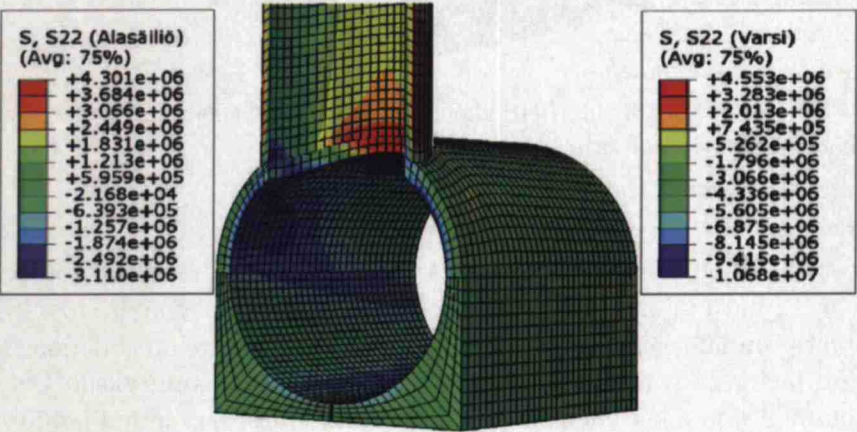
Lämpöjännitykset kesäolosuhteessa kehän suunnassa

Alasäiliön ja liitoksen lämpötilajakauma vaikuttaa lämpöjännitysten jakaumaan. Reaktoritornin lämpötilajakauma talvella ja kesällä ovat erilaiset ja tästä syystä myös lämpöjännityksetkin (vrt. kuva 77). Mitä korkeampi lämpötila alasäiliössä erityisesti alasäiliön yläosassa on sitä suurempia kehän suuntaisia lämpöjännityksiä aiheutuu reiän pieleen ja varren juuren läheisyyteen reunaehtotapauksessa **RE1**. Reunaehtotapauksessa **RE2** alasäiliön lämpölaajenemisen merkitys on pienempi kuin reunaehtotapauksessa **RE1** ja reunaehtotapauksessa **RE3** sillä ei ole melkein mitään merkitystä koska lämpölaajeneminen on vapaata kaikissa suunnissa.

Kuvissa 81 ja 82 on esitetty kehän suuntaiset lämpöjännitys jakaumat kesäolosuhteessa alasäiliössä ja varressa reunaehtotapauksissa **RE1** ja **RE2**.



Kuva 81: Reaktoritornin betonikerroksen lämpöjännitys jakauma kehän suunnassa lämpökuormasta reunaehtotapauksessa **RE1** kesäolosuhteessa.



Kuva 82: Reaktoritornin lämpöjännitys jakauma kehän suunnassa lämpökuormasta reunaehtotapauksessa **RE2** kesäolosuhteessa.

Kuvia 81 ja 81 vertailtaessa huomataan, että kehän suuntaiset lämpöjännitykset ovat suurimmillaan liitoksen pielessä ja varren juuressa kesäolosuhteessa reunaehdotapauksessa **RE1**. Reunaehdotapauksessa **RE2** lämpöjännitykset liitoksen ja sen läheisyyden betonikerroksessa ovat melkein samat kesä- ja talviolosuhteessa (vrt. kuvat 79 ja 82).

Mekaanisten ja lämpökuormien vaikutuksen tarkastelun jälkeen päädyttiin seuraaviin tuloksiin:

- Hydrostaattinen paine on merkittävin kuorma, joka aiheuttaa suuria vetojännityksiä kehän suuntaan erityisesti liitoksessa ja reiän läheisyydessä.
- Vaikka alasäiliön ja varren betonikerrosten paksuudet olivat pieniä liitoksessa omapainon ja tuulikuorman vaikutukset olivat silti pieniä.
- Alasäiliön lämpölaajenemista kuvaavilla reunaehdoilla on suuri vaikutus lämpöjännitysten suuruuteen ja jakaumaan. Reunaehdotapaus **RE2** soveltuu parhaiten alasäiliön lämpöjännitysten lujuusanalyysissa.

Mekaanisten kuormien aiheuttamien vetojännitysten pienentäminen vaatii joko betonikerrosten paksuntamista tai kuormien siirtämistä ulkopuolisille kannatimille. Lämpöjännitysten pienentämiseen vaikuttaa reaktoritornin lämpöjakauma. Lämpötilajakaumaan taas vaikuttavat rakennekerrosten paksuudet ja ominaisuudet sekä niiden sijoitus.

Kuvista 78, 79, 80 ja 82 nähdään, että hydrostaattinen paine aiheuttaa suurempia vetojännityksiä alasäiliön liitokseen ja sen ympäristöön kuin muut reaktoritornia rasittavat kuormat. Tästä syystä liitoksen tarkastelussa keskityttiin hydrostaattisen paineen aiheuttamien vetojännitysten pienentämiseen. Jotta vetojännityksiä voidaan pienentää on betonikerrosta paksunnettava liitoksessa ja sen läheisyydessä ts vahvennettava liitosta.

7.2 Liitoksen vahventaminen

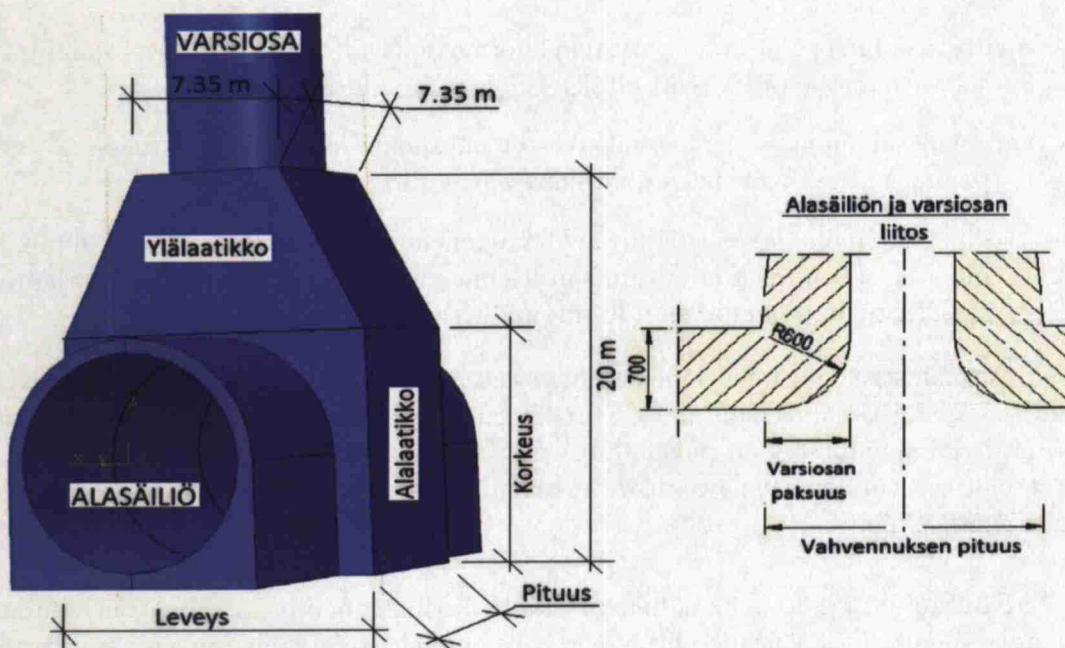
Mekaanisista kuormista ja lämpökuormasta aiheutuu betonikerrokseen suuria vetojännityksiä, joita ei voida kumota jännittämällä. Suurimmat vetojännitykset kohdistuvat alasäiliön ja varren liitoksen pieleen ja varren juureen ja ne ovat hyvin paikallisia. Hydrostaattisen paineen aiheuttamat vetojännitykset ovat suurempia kuin muut kuormat ja niihin voidaan vaikuttaa vahventamalla liitosta: betonikerroksen kasvattamisella tai liittorakenteella. Tästä syystä reaktoritornin alasäiliön ja varren liitoksen vahventamista tarkasteltiin hydrostaattisen paineen alaisena.

7.2.1 Liitoksen laatikollinen vahvennus

Betonikerroksen mittojen optimoinnin ja mallintamisen yksinkertaistamiseksi liitoksen vahventaminen tehtiin laatikoilla. Laatikkoita oli kaksi kappaletta: alalaatikko ja ylälaatikko. Alalaatikko oli suorakulmainen suorakulmiopohjainen laatikko.

Ylälaatikko oli katkaistu pyramidi, jonka yläpää oli sivuiltaan varren betonikerroksen ulkohalkaisijan mittainen neliö ja sen alapään sivujen mitat olivat samat kuin alalaatikon. Vahvennuksen kokonaiskorkeudeksi oletettiin 20 metriä (kts. kuva 83).

Vahvennuksen optimoinnissa alasäiliön ja varren liitokseen tehtiin säteeltään 0.6 metrin sisäpuolinen pyöristys. Kuvassa 83 on esitetty vahvennuksen muoto ja optimoitavat mitat.



Kuva 83: Liitoksen vahvennuksen muoto ja optimoitavat mitat.

Suurimmat kehän suuntaiset vetojännitykset esiintyvät reiän pielessä sekä alasäiliön sisä- ja ulkopinnassa liitoksen läheisyydessä (kts. kuva 74). Vahvennuksesta optimoitiin kolmea eri mittaa: pituutta, leveyttä ja korkeutta. Optimoinnin vaikutusta betonikerroksen kehän suuntaisiin vetojännityksiin omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta tarkasteltiin seuraavissa kohdissa: liitoksen pieli, alasäiliön sisäpinta ja vahvennuksen ulkopinta.

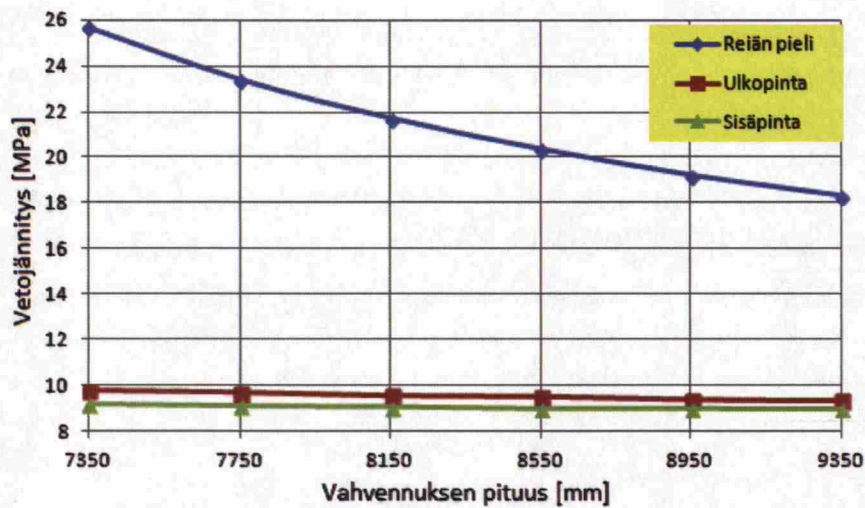
7.2.1.1 Vahvennuksen pituuden optimointi

Ensimmäiseksi optimoitiin vahvennuksen pituutta. Vahvennuksen muut mitat pysyvät vakioina: leveys 12.8 metriä ja korkeus 11.5 metriä. Vahvennuksen pituutta kasvatettiin pykälin 0.4 metriä. Taulukossa 30 on esitetty vahvennuksen pituus, varren paksuus liitoksessa alasäiliön pituusakselin suunnassa sekä optimoinnissa saadut kehän suuntaiset maksimivetojännitykset tukituissa kohdissa.

Taulukko 30: Vahvennuksen pituus, varren paksuus ja tutkituissa kohdissa vaikuttavatt kehän suuntaiset maksimivetojännitykset liitoksen läheisyydessä. Vahvannuksen korkeus ja leveys on oletettu olevan 11.5 metriä ja 12.8 metriä.

Vahvennuksen pituus [mm]	Varren juuren paksuus [mm]	Maksimijännitykset S22 [MPa]		
		Reiän pieli	Alasäiliön sisäpinta	Vahvennuksen ulkopinta
7350	400	24.57	8.78	8.79
7750	600	22.57	8.73	8.71
8150	800	20.87	8.69	8.58
8550	1000	19.66	8.48	8.56
8950	1200	18.40	8.40	8.43
9350	1400	17.40	8.60	8.38

Kuvassa 84 on esitetty kuvaaja taulukossa 30 tukittujen kohtien kehän suuntaiset vetojännityksistä vahvennuksen pituuden optimoinnissa.

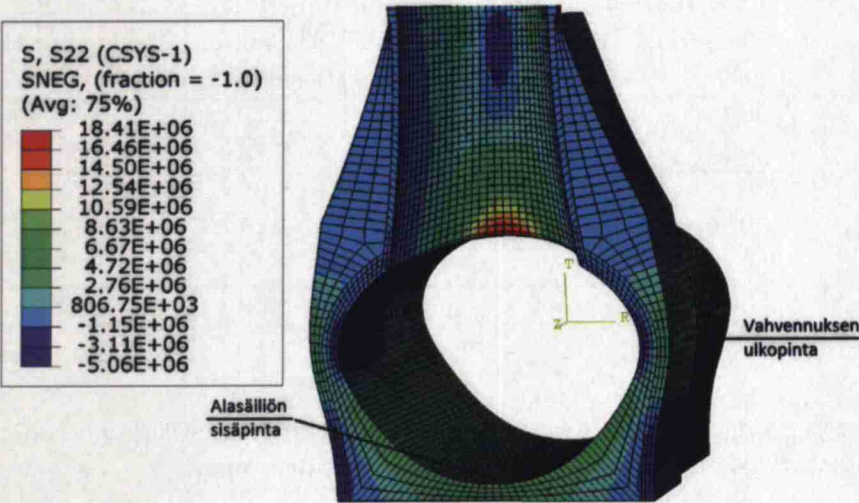


Kuva 84: Oman painon ja hydrostaattisen paineen aiheuttamat kehän suuntaiset maksimivetojännitykset liitoksen pielissä, alasäiliön sisäpinnassa ja vahvennuksen ulkopinnassa vahvennuksen pituuden suhteen.

Taulukosta 30 ja kuvasta 84 nähdään, että vahvennuksen pituuden kasvattaminen pienentää vetojännityksiä reiän pielessä, mutta sen vaikutus alasäiliön sisä- ja ulkopinnassa on mitättömän pieni. Myös huomataan, että vahvennuksen tehokkuus pienenee sen pituuden kasvaessa.

Mitä ohuempi betonirakenne on, sitä suurempia puristusjännityksiä sen poikki-leikkaukseen syntyy jännevoimasta (kts. taulukko 67). Vahvennuksen pituuden tehokkuus pienenee niin, että vetojännitys pienee enää korkeintaan 1 MPa. Näistä

syistä vahvennuksen pituutta ei enää kasvatettu. Jatkossa käytetään vahvennuksen pituutena 9350 mm. Kuvassa 85 on esitetty jännitysjauma reaktoritornissa vahvennuksen ympäristössä vahvennuksen pituuden ollessa 9350 mm.



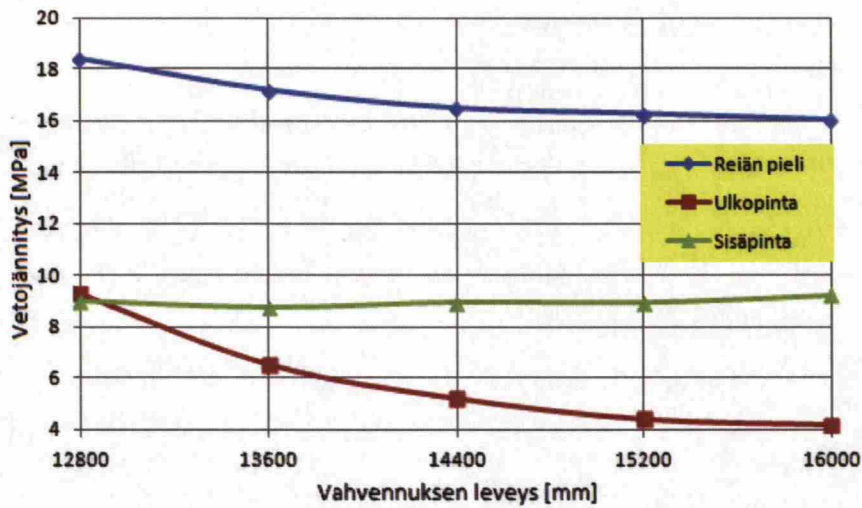
Kuva 85: Oman painon ja hydrostaattisen paineen aiheuttama alasäiliön suhteen kehän suuntainen jännitysjauma [Pa] reaktoritornin betonikerroksessa. Vahvennuksen pituus 9350 mm.

7.2.1.2 Vahvennuksen leveyden optimointi

Liitoksen vahvennusta paksunnettiin leveyssuunnassa 0.8 metrin pykälän eli 0.4 metriä kummallekin puolelle. Vahvennuksen korkeudeksi oletettiin 11.5 metriä ja sen pituutena käytettiin optimoitua 9.35 metriä. Taulukossa 31 ja kuvassa 86 on esitetty vahvennuksen leveys ja leveyden optimoinnissa saatuja kehän suuntaisia maksimivetojännityksiä betonikerroksessa tutkituissa kohdissa.

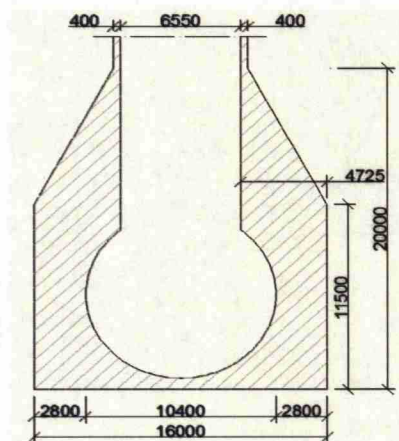
Taulukko 31: Vahvennuksen leveys ja kehän suuntaiset maksimivetojännitykset betonikerroksessa tutkituissa kohdissa.

Vahvennuksen leveys [mm]	Maksimijännitykset S22 [MPa]		
	Reiän pieli	Alasäiliön sisäpinta	Vahvennuksen ulkopinta
12800	18.41	9.03	9.32
13600	17.44	7.20	9.00
14400	17.00	5.92	9.31
15200	16.50	4.96	9.28
16000	16.06	4.20	9.25



Kuva 86: Oman painon ja hydrostaattisen paineen aiheuttamat kehän suuntaiset maksimivetojännitykset liitoksen pielissä, alasäiliön sisäpinnassa ja vahvennuksen ulkopinnassa vahvennuksen leveyden suhteen.

Taulukosta 31 ja kuvasta 86 nähdään, että vahvennuksen leveyden kasvattaminen pienentää vetojännityksiä reiän pielissä ja vahvennuksen ulkopinnassa, mutta sen vaikutuksen tehokkuus pienenee leveyden kasvaessa. Alasäiliön sisäpinnalla ei tapahdu oleellista muutosta vetojännityksissä. Vahvennuksen leveyden vaikutus on suurimmillaan vahvennuksen ulkopinnassa, mutta sen vaikutuskin pienenee nopeasti mitä leveämmäksi vahvennus tulee. Vahvennuksen leveyden kasvattamisella ei ole oleellista vaikutusta alasäiliön sisäpintaan. Vahvennuksen leveyttä ei kannattanut kasvattaa tätä leveämmäksi, joten jatkossa käytettiin vahvennuksen leveytenä 16 m. Kuvassa 87 on esitetty vahvennetun reaktoritornin betonikuoren poikkileikkaus alasäiliön poikkisuuntaan. Siitä nähdään, että betonikerroksen paksuus ylittää jopa 4.7 metriä.



Kuva 87: Vahvennetun reaktoritornin betonikuoren poikkileikkaus alasäiliön poikkisuuntaan vahvennuksen pituuden ja leveyden ollessa 9.35 ja 16 metriä.

7.2.1.3 Vahvennuksen korkeuden optimointi

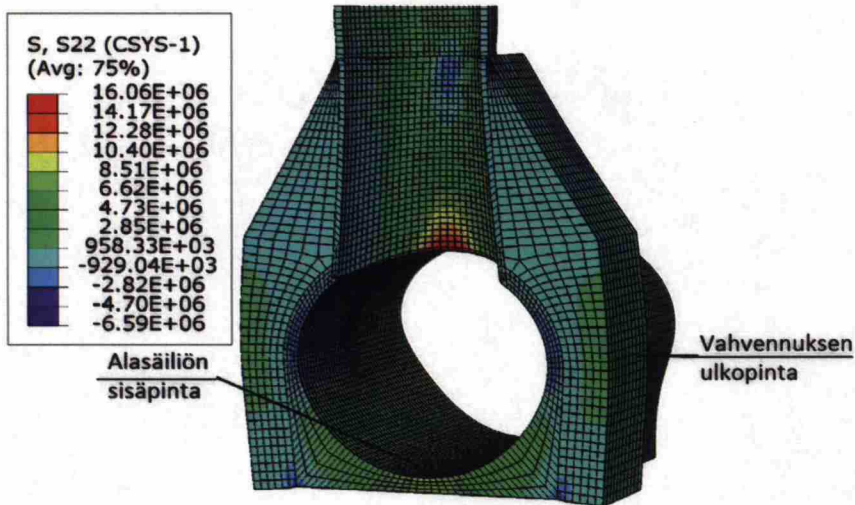
Seuraavaksi tarkastellaan vahvennuksen alalaatikon korkeuden vaikutusta betoni-kerroksen kehän suuntaisiin vetojännityksiin sen pituuden ja leveyden ollessa 9.35 metriä ja 16 metriä. Vahvennuksen alkukorkeudeksi oletettiin 11.5 metriä ja sitä pienennettiin 0.5 metrin pykälin. Maksimivetojännityksiä tarkasteltiin jälleen tutkituissa kohdissa. Taulukossa 32 on esitetty vahvennuksen alalaatikon korkeus ja maksimivetojännitykset kehän suunnassa tutkituissa kohdissa: reiän pieli, alasäiliön sisäpinta ja vahvennuksen ulkopinta.

Taulukko 32: Vahvennuksen korkeus ja betonikerroksessa vallitsevat maksimivetojännitykset kehän suunnassa pituuden ollessa 9.35 metriä ja leveyden ollessa 16 metriä.

Vahvennuksen korkeus [mm]	Maksimi vetojännitykset S22 [MPa]		
	Reiän pieli	Alasäiliön sisäpinta	Vahvennuksen ulkopinta
10000	16.67	4.26	9.30
10500	16.42	4.29	9.27
11000	16.24	4.24	9.28
11500	16.06	4.24	9.25

Taulukosta 32 nähdään, että vahvennuksen alalaatikon korkeuden pienentäminen ei vaikuta oleellisesti vetojännityksiin tutkituissa kohdissa. Vetojännitykset sisä- ja ulkopinnassa ovat melkein samat ja reiän pielessä vetojännitys kasvaa hieman.

Kuvassa 88 on esitetty optimoidun vahvennuksen omaavan reaktornitornin jännitysjakauma alasäiliön suhteen kehän suunnassa omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta. Optimoidun vahvennuksen mitat ovat: pituus = 9.35 m, leveys = 16 m ja alalaatikon korkeus = 11.5 m.



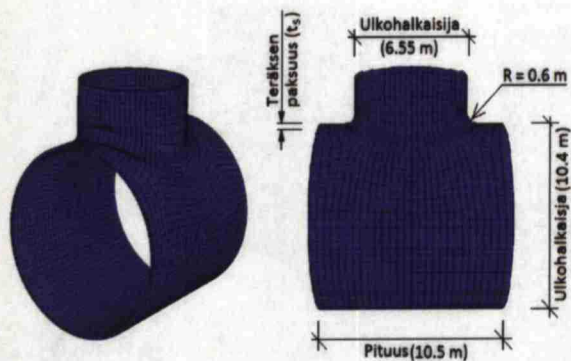
Kuva 88: Jännitys jakauma [Pa] reaktoritornin omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta kehän suunnassa optimoidun vahvennuksen mittojen ollessa: pituus = 8.55 m, leveys = 13.6 m ja alalaatikon korkeus = 9 m.

Laatikkomaisen vahvennuksen mittojen vaikutuksen tarkastelussa huomattiin, että betonikerrokseen aiheutuvia vetojännityksiä ei pystytä pienentämään tehokkaasti betonikuoren paksuuksia kasvattamalla. Taulukoista 30 ...32 voidaan nähdä, että suurimmat vetojännitykset kohdistuvat reiän pieleen kehän suunnassa ja ne ovat hyvin paikallisia. (kts. kuva 88). Suuret betonikerroksen paksuudet, suuret vetojännitykset betonikerroksessa ja monimutkainen liitoksen geometria tekevät jännitysten kumoamista jännevoimalla kovin haasteelliseski. Tästä syystä liitosta oli vielä vahvistettava hyvän vetolujuuden omaavalla materiaalilla betonin kanssa (liittorakenne).

7.3 Liittorakenteinen liitos

Luvun 7.2.1 tulosten perusteella betonikerroksen paksuuden kasvattamisella ei pystytä pienentämään vetojännityksiä tehokkaasti. Vetojännitykset ovat suurimmillaan reiän pielissä ja ne ovat hyvin paikallisia (kts. kuva 88). Näistä syistä tutkittiin vielä vahvennetun liitoksen (pituus = 9.35 m, leveys = 16 m ja alalaatikon korkeus = 11.5 m) vahventamista materiaalilla, jonka vetolujuus on suurempi kuin betonin vetolujuus.

Reaktoritornin liitosta vahvennettiin vielä teräspannalla. Teräspannan muoto oli samanlainen kuin reaktoritornin liitoksen sisäpinnan muoto. Teräspannan ja reaktoritornin betonikerroksen välille oletettiin täydellinen tartunta. Kuvassa 89 on esitetty teräspannan muoto mittoineen.



Kuva 89: Teräspannan muoto ja mitat.

Reaktoritorni kuormitettiin omalla painolla ja hydrostaattisella paineella. Taulukossa 33 on esitetty teräspannan paksuus, maksimivetojännitykset reiän pielessä teräksessä ja betonissa sekä alasäiliön sisäpinnan ja vahvennuksen ulkopinnan betonikerroksessa.

Taulukko 33: Teräspannan paksuus ja maksimivetojännitykset reiän pielessä teräksessä ja betonissa sekä alasäiliön sisäpinnan ja vahvennuksen ulkopinnan betonikerroksessa.

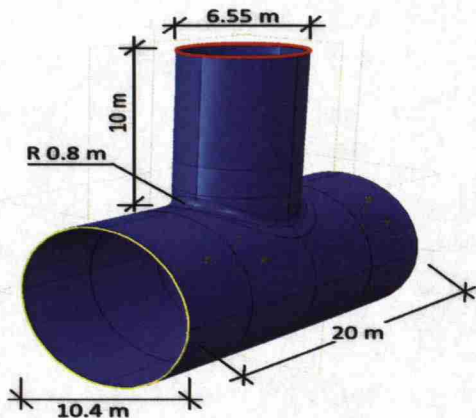
Teräspannan paksuus [mm]	Maksimivetojännitys S22 [MPa]			
	Reiän pieli		Alasäiliön sisäpinta	Vahvennuksen ulkopinta
	Teräs	Betoni		
25	89.23	14.7	5.89	6.47
50	79.24	12.17	5.03	5.85
75	70.77	10.60	4.50	5.40
100	63.79	9.22	3.96	5.03

Taulukosta 33 nähdään, että teräspanta vähentää vetojännityksiä betonikerroksessa, mutta ne pysyvät edelleen suhteellisen korkeina. Mitä paksumpaa teräspantaa käytetään sitä suurempaa osaa teräksen kapasiteetista jää käyttämättä riippuen teräslaadusta. Esimerkiksi 100 mm:n teräspantaa käytettäessä yli 80% teräksen myötölujuuden kapasiteetista jää käyttämättä hyväksi teräslaadun ollessa S335. Tämän vuoksi reaktoritornin liitos oli tutkittava kokonaan teräsrakenteisena. Liitteessä 8 on esitetty rakenneterästen myöty- ja murtolujuuksia.

7.4 Teräsrakenteinen liitos

Reaktoritornin liitos ei ole toimivaa betonirakenteisena eikä betoni-teräs-liittorakenteena. Betonirakenteisena reiän pieleen aiheutuu niin suuria vetojännityksiä, että on haasteellista ottaa niitä jännevoimalla. Liittorakenteena vain murto-osaa teräksen vetokapasiteetista hyödynnettiin. Tämän takia liitos tutkittiin vielä kokonaan teräk-

sisenä rakenteena. Mallinnuksena käytettiin 20 metriä pitkä ja sisäsäteeltään 5.2 metrinen alasäiliö, jonka keskelle mallinnettiin 10 metriä korkea ja sisäsäteeltään 3.275 metrinen varsi. Reiän ulkopuolinen pieli pyöristettiin säteeltään 0.8 metriä. Reaktoritornin varren ja yläsäiliön omat painot ja niiden välityksellä aiheutuvat kuormitukset oletettiin siirtyvän perustuksiin erillisten rakenteiden avulla. Varren yläpään asetettiin jäykäksi pyörähdysymmetrisesti ja alasäiliön päätyjen siirtymät pituussuuntaan estettiin. Alasäiliö kuormitettiin hydrostaattisella paineella. Kuvassa 90 on esitetty 3D-malli teräksisestä alasäiliön ja varren liitoksesta.

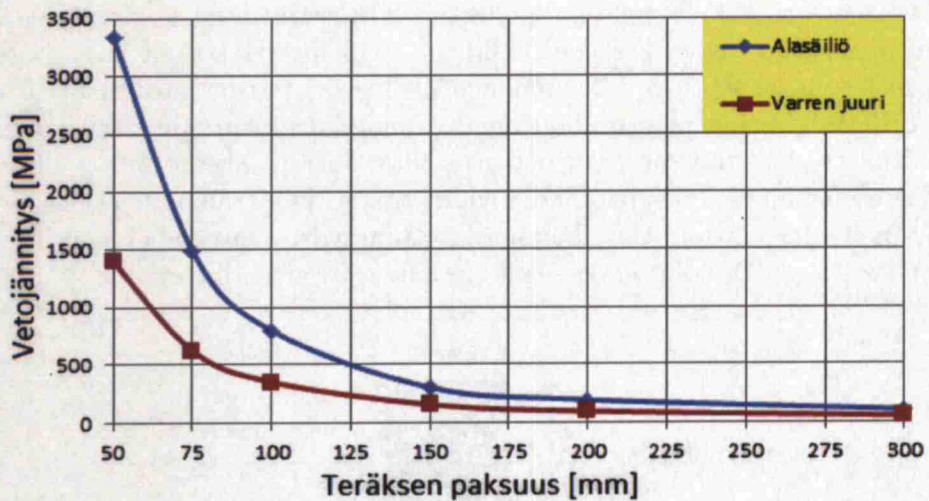


Kuva 90: Teräsrakenteinen alasäiliön ja varren liitos. Mallinnuksen varren yläpään ja alasäiliön päätyjen reunaehdot on havainnollistettu värein. Punainen = jäykkä ja keltainen = pituussuuntainen siirtymä estetty.

Taulukossa 34 ja kuvassa 91 on esitetty teräsrakenteen paksuus ja lujuusanalyysistä saadut kehän suuntaiset maksimivetojännitykset alasäiliössä ja varren juuressa.

Taulukko 34: Teräsrakenteisen seinämän paksuus ja alasäiliön ja varren liitoksen kehän suuntaiset maksimijännitykset alasäiliössä ja varren juuressa.

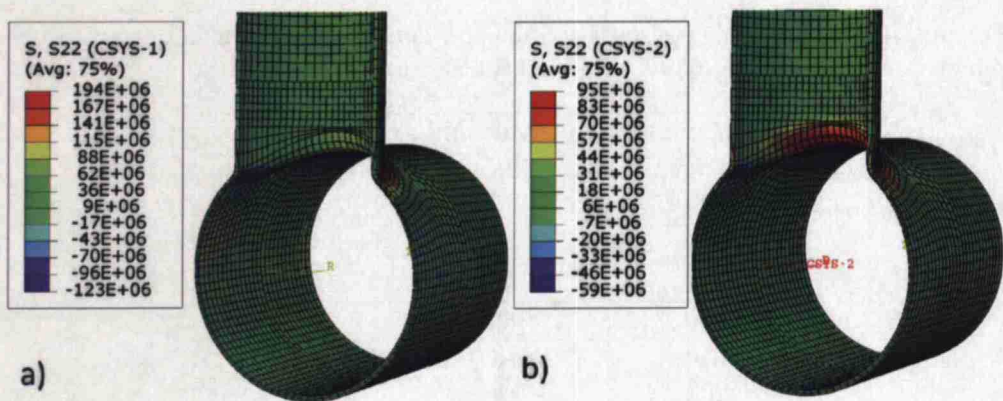
Teräs ­ spannan paksuus [mm]	Maksimivetojännitys	
	Alasäiliössä S22 [MPa]	Varren juuressa S22 [MPa]
50	3336	1401
75	1494	627
100	800	354
150	304	157
200	194	95
300	107	55



Kuva 91: Hydrostaattisen paineen aiheuttama kehän suuntainen maksimivetojännitys teräsrakenteisen liitoksen alasäiliössä ja varren juuressa seinämän paksuuden suhteen.

Kuvasta 91 nähdään, että mitä paksumpi teräsrakenne on sitä pienemmäksi vetojännitykset tulevat. Koska alasäiliö roikkuu varren varassa suurimmat vetojännitykset esiintyvät alasäiliön pielessä kehän suunnassa (kts. kuva 92). Teräsrakenteen paksuuden kasvattamisen tehokkuus pienenee. Teräslaatu S355 käytettäessä teräsrakenteen paksuuden on oltava vähintään 150 mm.

Kuvassa 92 on esitetty 200 mm paksua teräspantaa ja siihen aiheutuva kehän suuntainen jännitysjaakauma hydrostaattisesta paineesta. Siitä nähdään, että liitosta rasittavat suurimmat vetojännitykset ovat reiän pielissä ja hyvin paikallisia.



Kuva 92: 200 mm paksu teräspanta ja siihen aiheutuva kehän suuntainen jännitysjaakauma [Pa] hydrostaattisesta paineesta alasäiliössä ja varressa. a) jännitysjaakauma alasäiliön kehän suuntaan suhteen b) jännitysjaakauma varren kehän suunnan suhteen.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityö sisältää katsauksen reaktoritornin varren keskiosalle kohdistuneista aiemmista tutkimuksista, kirjallisuuskatsauksen pyörähdyssymmetrisistä kuorirakenteista ja reaktoritornin laskennallisesta tarkastelusta. Laskennallinen tarkastelu sisältää rakenteen tarkastelun käsilaskennalla ja elementtimenetelmään perustuvalla Abaqus/CAE-tietokoneohjelmistolla. Laskennallisessa tarkastelussa tarkastellaan reaktoritornin vartta vapaasti ja jäykästi kiinnitettynä, alasäiliötä kaukana liitoksesta ja periaateellista liitosta alasäiliön ja varren välillä.

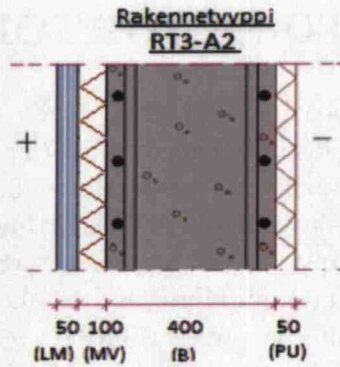
Työssä käsitellyt aiheet ovat: lämmönsiirto, voimasuureet, jännitykset ja raudoittaminen. Lämmönsiirto analyysissa on otettu huomioon ainoastaan konduktio (johtuminen). Lämmönsiirtotehtävää tarkasteltiin stationäärisessä tilassa ja varressa myös epästationäärisessä tilassa.

8.1 Reaktoritornin varsi

Reaktoritornin varren mallinnus tehtiin kolmella eri laskentamallilla: 3D-malli, aksisymmetrisistä tilavuuselementeistä koostuva 2D-malli, ja kuorielementtimalli. Abaqus-mallinnuksen lisäksi varren betonikerroksen pintojen lämpötilat ja näiden avulla lämpötilan muutos ja lämpögradientti laskettiin käsinlaskennalla. Laskentamallien avulla tutkittiin varren betonikerroksen sisä- ja ulkopinnan lämpötiloja, jännityksiä ja betonikerrokseen aiheutuvia voimasuureita (normaalivoima ja taivutusmomentti).

Edellisessä tutkimuksessa varren keskiosalle optimoidun rakenneratkaisun (rakennetyyppi RT3-A) kelpoisuutta [1] tutkittiin kesäolosuhteessabetonin pitkäaikaisen lämpötilan suhteen. Rakennetyypin RT3-A betonikerroksen lämpötila ylitti betonille suositeltua pitkäaikaista lämpötilaa. Tämän vuoksi varrelle etsittiin uusi rakennetyyppi optimoimalla rakennetta betonikerroksen lämpötilan ja lämpögradientin suhteen.

Optimointi tehtiin käsinlaskennalla stationäärisessä tilassa betonikerroksen pintojen lämpötilan suhteen. Optimoitu rakenneratkaisu RT3-A2 oli sisäkerroksesta lukien: lujitemuovi (50mm), mineraalivilla (100 mm), betoni (400 mm) ja polyuretaani (50 mm). Betonikerroksen sisäpinnan lämpötilaksi saatiin 60.5 °C, joka pysyy betonin suositelluissa lämpötiloissa. Optimoidun rakenneratkaisun lämpögradientti (sisä- ja ulkopinnan lämpötilaero) tutkittiin epästationäärisessä tilassa talviolosuhteessa 3D-mallia käyttäen. Laskennasta huomattiin, että lämpögradientti saa suurimman arvonsa noin 15 vuorokauden päästä ja se pysyy muuttumattomana. Kuvassa 93 on esitetty lämpötilan suhteen optimoitu rakenneratkaisu.



Kuva 93: Lämpötilan suhteen optimoitu varren rakenneratkaisu.

Kuorielementtimallilla tutkittiin lämpökuorman ja mekaanisten kuormien aiheuttamia jännitysjaakaukia ja voimasuureita. Kuorielementtimallissa seinämän oletettiin koostuvan vain betonikerroksesta. Aiemmassa tutkimuksessa [15] on todettu, että lujitemuovin merkitys rakenteen kantavana osana on vähäinen. Varta tarkasteltiin siihen vaikuttaville mekaanisille kuormille ja lämpökuormalle. Sitä tarkasteltiin lämpökuorman suhteen kuormitustapauksissa talviolosude, kesäolosuhde ja poissa-käytöstä, jossa reaktoritorni oli tyhjä ja rakenteiden lämpötilat olivat pudonneet -20°C :iin talviolosuhteessa. Jäykästi tuettua varta tarkasteltiin kahdessa eri kohdassa: juuressa ja 4 metrin päässä juuresta (reunahäiriön ulkopuolella). Kuorielementtimallilla määritellyillä voimasuureilla arvioitiin tarvittavat raudoitusmäärät.

Laskentamallilla osoitettiin, että betonirakenteeseen vaikuttavat kehän suuntaiset voimasuureet olivat suurempia kuin pystysuuntaiset. Määräävä kuorma oli hydrostaattinen paine vapaasti tuetussa varressa ja jäykästi tuetussa varressa joko hydrostaattinen paine tai lämpökuorma. Jäykästi tuetun varren juuressa määrääväksi kuormaksi osoittautui lämpökuorma Tyhjä, josta aiheutui suuria vetäviä normaali-voimia betonirakenteeseen kehän suunnassa. Vastaavasti yli 4 metrin päässä juuresta eli reunahäiriön ulkopuolella hydrostaattinen paine tuli määrääväksi kuormaksi.

Määräävä kuormitusyhdistelmä kehän suuntaisten voimasuureiden suhteen oli KY-5, jossa pysyvät kuormat rasittivat reaktoritornin varta. Kuormitusyhdistelmässä osavarmuuskertoimenä käytettiin 1.35. Jäykästi tuetun teräsbetonirakenteisen varren juuressa tarvittava raudoitusmäärä ei mahdu betonirakenteeseen suurten kehän suuntaisten voimasuureiden takia murtorajatilassa.

Reaktoritornin varren betonirakenteeseen aiheutuvat vetojännitykset laskettiin kuorielementtimallia käyttäen. Kuormitustapauksessa Talviolosuhde aiheutuu suurimmat vetojännitykset betonikerrokseen vapaasti tuetussa varressa ja jäykästi tuetun varren reunahäiriön ulkopuolella. Vastaavasti suurimmat vetojännitykset aiheutuvat jäykästi tuetun juuren betonirakenteeseen kuormitustapauksessa Poissa-käytöstä.

Aksisymmetrisellä mallilla tutkittiin jännevoiman aiheuttamaa jännitysjakautumaa betonikerroksessa. Aksisymmetrisessä mallissa varren seinämän oletettiin koostuvan vain betonikerroksesta. Koska seinämä oli rasitettu eniten kehän suunnassa, tutkittiin ainoastaan betonipoikkileikkauksen vaakasuuntaista esijännitystä. Diplomityössä varrelle esitetyn esijännityksen järjestelmän avulla saadaan betonin poikkileikkaukseen puristusjännityksiä vapaasti tuetussa varressa ja jäykästi tuetun varren reunahäiriön ulkopuolella. Esijännityksestä aiheutuu vetojännityksiä jäykästi tuetun varren juuren ulkopintaan riippuen siitä miten lähellä alin jännekaapeli on varren reunasta. Jännevoiman aiheuttamat puristusjännitykset ovat riittävät kumoamaan betonikerrokseen aiheutuvia vetojännityksiä vapaasti tuetussa varressa ja jäykästi tuetun varren reunahäiriön ulkopuolella.

Diplomityön tulosten perusteella voidaan todeta, että varren betonikerroksen lämpötila pysyy suositelluissa pitkäaikaisissa lämpötiloissa kaksinkertaisemalla aiemmassa diplomityössä [1] optimoidun rakennetyypin sisäpinnan mineraalivillaa. Varren ollessa vapaa laajenemaan säteensuunnassa sen betonikerrokseen vaikuttavat vetojännitykset voidaan kumota diplomityössä esitetyn esijännitysjärjestelmällä. Jotta lämpökuorman aiheuttamia suuria vetojännityksiä voidaan välttää jäykästi tuetun varren juuren betonikerroksessa, on reaktoritorniin tehtävä lämmitysjärjestelmä talvella reaktoritornin ollessa poissa käytöstä. Varren betonikerroksen jännittäminen jäykästi kiinnitetyn juuren läheisyydessä paikalla aiheuttaa vetojännityksiä betonikerroksen ulkopintaan juuren läheisyydessä. Tämä voidaan välttää käyttämällä esijännitettyä betonielementtiä varren juuressa.

8.2 Reaktoritornin alasäiliö

Reaktoritornin alasäiliön optimointi tehtiin 3D-mallilla. 3D-laskentamallien avulla valittiin alasäiliön muoto ja tutkittiin alasäiliön erilaisten parametrien, kuten seinämän rakennekerrosten lukumäärän ja kerrosten rakennepaksuuksien vaikutusta lämpötila- ja jännitysjakautumiin. Alasäiliölle tehtiin kaksi eri analyysia: lämmönsiirtoanalyysi ja lujuusanalyysi. Lämmönsiirtoanalyysissä saatua betonikerroksen lämpötilajakautumaa käytettiin lämpökuormana. Alasäiliön oletettiin tukeutuvan painumatomaan ja kitkattomaan alustaan. Tutkittiin jännevoimasta aiheutuvaa jännitys- ja kaumaa alasäiliön yläosassa aksisymmetristä mallia käyttäen.

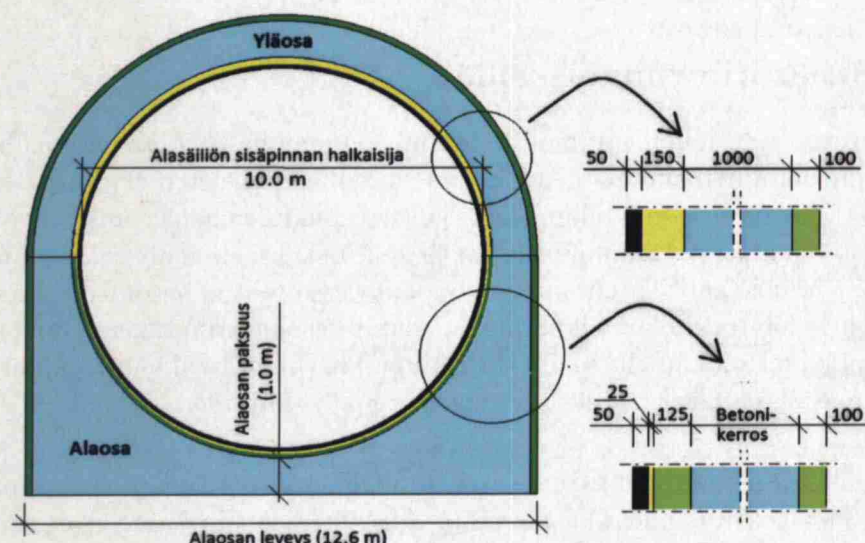
Alasäiliön muodon määrittämiseksi tutkittiin kahta eri muotoa: tasapaksuinen alasäiliö ja alaosaltaan jäykkä alasäiliö. Alasäiliö jaettiin kahteen osaan: ala- ja yläosa. Yläosa oli sama molemmissa alasäiliön muodoissa. Yläosa mallinnettiin alapäin aukeavana tasapaksuisena puolipyöränä. Alaosa oli tasapaksuisessa alasäiliössä yläosan peilikuva ja alaosaltaan jäykässä alasäiliössä se oli sisäpinnaltaan ylöspäin aukeava puolipyörä ja ulkopinnat muodostuivat pysty- ja vaakasuuntaisista tasoista. Alaosan yläpään paksuus oli sama kuin yläosan.

Alasäiliön muodot tutkittiin ainoastaan hydrostaattiselle paineelle, joten säiliön seinämänä käytettiin ainoastaan betonikerrosta. Yläosan seinämän paksuudeksi ole-

tettiin 400 mm. Tutkimuksen tuloksena osoitettiin, että tasapaksuun alasäiliöön aiheutuu suurempia säteensuuntaisia siirtymiä (yli 7 kertaa) ja kehän suuntaisia vetojännityksiä (270%) kuin alaosaltaan jäykkään alasäiliöön.

Häiriöalueen ulkopuolinen osuus alaosaltaan jäykästä alasäiliöstä tutkittiin vetojännitysten ja betonille suositellun pitkäaikaisen lämpötilan suhteen. Kuormina käytettiin hydrostaattista painetta ja lämpökuormaa. Alasäiliö tarkasteltiin sekä maanpäällisenä että myös maanpaineen rasittamana maanalaisena rakenteena. Rakennerratkaisun lähtökohtana käytettiin edellisessä tutkimuksessa optimoitua rakennerratkaisua [1], jonka rakennekerrokset olivat sisältä ulos: lujitemuovi (50mm), mineraalivilla (50 mm), betoni ja polyuretaani (50 mm).

Alustavana tavoitteena oli pienentää betonikerroksen vetojännityksiä korkeintaan 10 MPa:iin. Jännityksiä pienennettiin optimoimalla betonikerroksen ja lämmöneristekerrosten paksuuksia ja lämmöneristekerrosten lukumäärää. Betonikerroksen paksuuden kasvattamisella pystyttiin pienentämään hydrostaattisen paineen aiheuttamia vetojännityksiä ja vastaavasti lämmöneristeiden paksuntamisella lämpöjännityksiä. Mitä paksumpi betonikerros oli sitä suuremmat lämpöjännitykset betonikerrokseen aiheutuivat. Alasäiliö optimoitiin maanpäällisenä rakenteena ja optimoitu rakenne tarkasteltiin maanalaisena rakenteena. Kuvassa 94 on esitetty optimoitu alasäiliö betonikerroksen vetojännitysten ja betonille suositellun pitkäaikaisen lämpötilan suhteen.

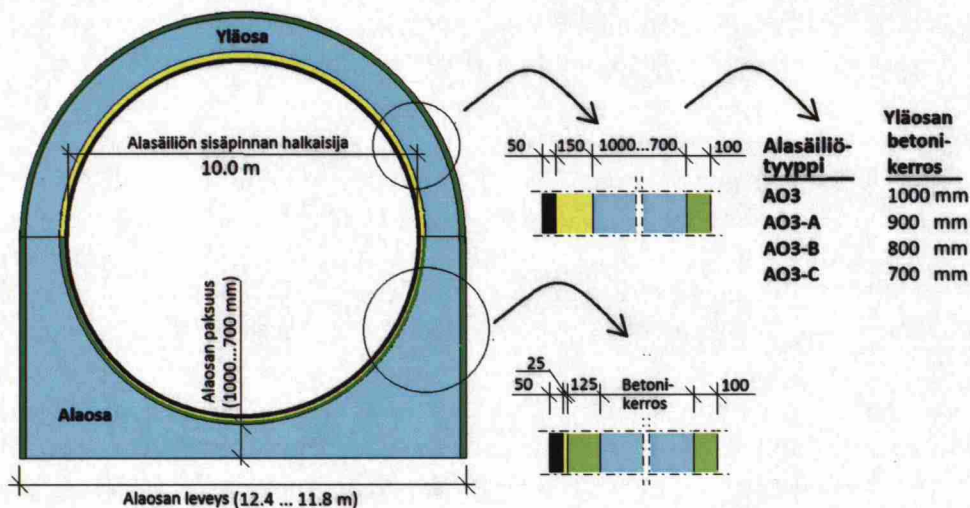


Kuva 94: Optimoidun alasäiliötyypin AO3 rakennerratkaisut. Rakennekerrokset on havainnollistettu värein: musta = lujitemuovi, keltainen = mineraalivilla, sininen = betoni ja vihreä = polyuretaani.

Hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman yhteiset vetojännitykset olivat suuremmat ala- ja yläosan liitosalueella. Lämpöjännityksiä kyseisellä alueella yritettiin

pienentää pienentämällä ala- ja yläosan liittymäpäiden siirtymäeroja. Tähän pyrittiin pienentämällä alaosan tasaista lämpötilan muutosta ja lämpögradienttia sekä kasvattamalla yläosan tasaista lämpötilan muutosta. Alasäiliön lämmönsiirtoanalyysissä saatiin selville, että sisä- ja ulkopuoliset lämmöneristeet ovat tarpeen pitämään betonikerroksen maksimilämpötila melkein suositelluissa rajoissa ja sen pintojen lämpötilaero pienenä. Luujuusanalyysillä osoitettiin, että alasäiliön alaosan sisäpuolisten lämmöneristeiden lämmöneristävyys on oltava parempi kuin yläosan, jotta lämpöjännitykset ala- ja yläosan liittymäkohdan ympäristössä jäisivät pieniksi. Lämpöjännitykset olivat suurimmillaan talvioloshuteessa maanpäällisen alasäiliön betonikerroksessa. Kesäolosuhteessa tai alasäiliön ollessa puolittain tai kokonaan maanalainen lämpöjännitykset olivat pienempiä ja lämpötilat korkeampia kuin talviolosuhteess. Betonikerroksen alustavasti tavoiteltua vetojännityksen raja (≤ 10 MPa) saavutettiin alasäiliötyypillä AO3, jossa suurin vetojännitys oli 9.4 MPa ja betonikerroksen maksimilämpötila 68.4 °C.

Saman jännevoiman aiheuttama puristusjännitys lieriömäisessä betonirakenteessa on kääntäen verrannollinen betonikerroksen paksuuteen. Soveltamalla esijännitetyn pyörähdyssymmetrisen lieriön jännitysjakaumaa alasäiliön yläosaan huomattiin, että hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman kuormittaman yläosan betonirakenteen poikkileikkaukseen saadaan enemmän puristusjännityksiä mitä ohuempi yläosan paksuus on samalla jännevoimalla. Kuvassa 95 on esitetty alasäiliötyyppejä, joiden yläosan betonikerroksen jännitystilaa tutkittiin jännitettynä rakenteena. Alasäiliötyypin AO3-C yläosaa jännitettiin VSL-ankkurijärjestelmällä, jonka tuloksena saatiin kauttaaltaan puristettua yläosan poikkileikkausta.



Kuva 95: Optimoitu alasäiliötyyppi hydrostaattisen ja lämpökuorman suhteen yläosa jännitettynä rakenteena VSL-ankkurijännementelmää käyttäen. Värien merkitys: musta = lujitemuovi, keltainen = mineraalivilla, sininen = betoni ja vihreä = polyuretaani.

8.3 Alasäiliön ja yläosan liitos

Reaktoritornin alasäiliön ja varren välistä liitosta tutkittiin 3D-mallilla. 3D-laskentamallien avulla tutkittiin eri kuormien vaikutuksia jännitysjakamaan liitoksessa ja sen ympäristöössä. Liitosta vahvennettiin laatikollisin betonikerroksin, jotka koostuivat suorakulmaisista laatikoista ja katkaistuista pyramideista. Liitoksen vahvennuksen mittoja: pituutta, leveyttä ja korkeutta optimoitiin betonikerrokseen aiheutuvien vetojännitysten suhteen. Liitosta tutkittiin myös liittorakenteena (teräs ja betoni). Lisäksi liitosta tutkittiin teräsrakenteisena, jossa alasäiliö roikkui varren varassa. Tarkastelut tehtiin oman painon ja hydrostaattisen paineen alaisena.

Laskentatuloksista saatiin selville, että hydrostaattinen paine on määräävin tekijä liitoksen kuormista aiheuttaen suuria vetojännityksiä liitokseen erityisesti reiän pieleen. Myös lämpökuorman aiheuttama vetojännitys reiän pielessä on suuri (yli 5 MPa). Oman painon ja tuulikuorman vaikutukset ovat pienet verrattuna hydrostaattisen paineen ja lämpökuorman vaikutuksiin. Suurimmat luonteeltaan paikalliset vetojännitykset aiheutuvat alasäiliön reiän pieleen ja varren juureen kehän suunnassa.

Betonivahvennuksen mittojen kasvattamisella ei pystytty tehokkaasti pienentämään betonikerrokseen aiheutuvia vetojännityksiä. Mittojen kasvattamisen vaikutus pieneni mitä paksumpia ne olivat. Vahvennuksen pituuden, leveyden ja korkeuden ollessa 9.35 m, 16.0 m ja 11.5 m liitoksen reiän sisäpintaan aiheutui 16.5 MPa (kts. kuva 88). Betonikerroksen paksuudet liitoksessa ja sen ympäristössä ovat suuret, suurimmillaan 4.75 m. Tällöin myös liitosalueen geometria on monimutkainen. Täten betonikerroksen jännittäminen käy haasteelliseksi, mikäli halutaan kumota betonikerrokseen aiheutuvat vetojännitykset jännevoimalla.

Terässpannan lisäämisellä betonivahvennetun liitoksen sisäpintaan (liittorakente) vetojännitykset pienenevät vain vähän. Esimerkiksi 100 mm:n paksulla terässpannan lisäyksellä vetojännitys reiän pielessä pieneni 16.06 MPa:sta 9.2 MPa:iin. Liittorakenteisena liitoksena vain pieni osa terässpannan myötölujuuden kapasiteetista käytetään hyväksi. 100 mm:n teräspantaa käytettäessä yli 80 % teräksen myötölujuuden kapasiteetista jäi käyttämättä hyväksi teräslaadun ollessa S355.

Alasäiliön ja varren liitoksen ollessa teräsrakenteinen hydrostaattisesta paineesta aiheutuvat suurimmat vetojännitykset keskittyivät reiän ulkoreunaan alasäiliössä kehän suunnassa ja varren juuren sisäpintaan kehän suunnassa (kuva 92). Vetojännitys teräsrakenteessa pieneni mitä paksumpi rakenne oli. Myös teräsrakenteen paksuuden tehokkuus pieneni paksuuden kasvaessa. 100 mm:n paksun teräsrakenteinen liitos ei kestä hydrostaattista painetta, koska teräkseen aiheutuu 800 MPa vetojännitys. Rakenteen paksuuden ollessa 150 mm hydrostaattisen paineen aiheuttama vetojännitys on sitä vastoin korkeintaan 305 MPa.

8.4 Jatkotutkimustarve

Tässä tutkimuksessa tarkastellut rakennetyypit ovat uudentyyppisiä rakenteita, joten ne tarvitsevat vielä kehittämis- ja tutkimustyötä. Materiaalikerrosten välistä tartuntaa ja yhteistoimintaa sekä lujitemuovin muodonmuutos- ja kantavuustarkastelut on tarkasteltava jatkotutkimuksissa. Mitoituksissa on huomioitava lisäksi kuormitustapauksia mm. häiriö- ja onnettomuus tilanteet ja maanjärjistykselle maanjärjestyskuormaa.

Varsi ei ole vapaasti eikä jäykästi tuettu sen liittyessä alasäiliöön. Siihen vaikuttaa alasäiliön ja varren liitoksen jäykkyys juuren läheisyydessä. Tästä syystä vartta on tutkittava tarkemmin liitoksen läheisyydessä. Alasäiliön tarkastelussa todettiin, että alasäiliön alapinnan lämpötilajakaumalla on jonkinlainen vaikutus lämpöjännityksiin alasäiliössä, joten tarkempaa maaperän lämpötilajakauman vaikutusta olisi hyvää selvittää. Alasäiliötä tutkittiin kaukana liitoksesta, joten liitoksen vaikutus alasäiliössä on tutkittava myös. Alasäiliön ja liitoksen tarkasteluissa tehdyt mallinnukset on koottu vähintään kahdesta osasta. Geometrialtaan ja elementtiverkoltaan kahden erilaisen rakenteen liittäminen toisiinsa Abaqus-ohjelmalla saattaa vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Myös elementtiverkon ja elementtityyppien vaikutus jännitysjakautumisiin on selvitettävä.

Liitoksen lämpötilajakaumaa tässä tutkimuksessa ei ole tutkittu, joten lämpötilajakaumaa ja sen vaikutus lämpöjännityksiin on tutkittava. Koska kyseessä on geometrialtaan monimutkainen ja monesta osasta yhdistettävä rakenne, lämpötilajakauma ja tämän takia lämpöjännitykset alasäiliön ja varren liitoksessa ja sen ympäristössä tutkittava tarkemmin jatkotutkimuksissa. Vahvennettu liitos tutkittiin ainoastaan oman painon ja hydrostaattisen paineen alaisena, joten muiden kuormien vaikutuksetkin on jatkossa otettava huomioon.

Viitteet

- [1] Aid Al-hello. (2011). Kaivosteollisuuden teräsbetonisen reaktoritornin varren rakenteellinen optimointi. Espoo. Teknillinen korkeakoulu.
- [2] A. Ghali. Circular Storage Tanks and Silos. London: E. & F.N. Spon Ltd, 1979. ISBN:0-470-26727-5.
- [3] P.W. Abeles & B.K. Bardhan-Roy. Prestressed concrete designer's handbook. Wexham Springs : CCA, 1981. ISBN:0-7210-1227-2
- [4] Arvo Ylinen. Kimmo- ja lujuusoppi II. Toinen, uudistettu ja tarkistettu painos. Werner Söderström osakeyhtiö, Porvoo, 1970.
- [5] Dassault Systems 2009b. Getting Started with Abaqus: Interactive Edition. Providence: Dassault Systmes Simulia Corp. Haettu 1.11.2010. Saatavilla: <http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.9/books/gsa/default.htm>.
- [6] D. P. RAJKOTJA & W. C. SCHNOBRICH, A STRESS ANALYSIS OF CIRCULAR CYLINDRICAL SHELL INTERSECTIONS, INCLUDING THE INFLUENCES OF REINFORCEMENT, CYCLIC PLASTICITY AND FATIGUE. 1980. URBANA, UNIVERSITY OF ILLINOIS.
- [7] Eduard Ventsel, Theodor Krauthammer. Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications. New York : Marcel Dekker, 2001. ISBN: 0-8247-0575-0.
- [8] El Houssine Bartali and Frank J. Hatfield. Forces in Cylindrical Grain Silos Caused by Decreasing Ambient Temperature. ACI STRUCTURAL JOURNAL, January-February 1990, Title no. 87-S13.
- [9] Encyclopædia Britannica 2010. Hydrometallurgy. Haettu: 20.9.2010. Saatavilla: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/278933/hydrometallurgy>.
- [10] K. R. Rao. (2009). ACI Standard 359-10. Code for Concrete Containments. The American Society of Mechanical Engineers. New York. NY. USA.
- [11] Kari Ikonen. Levy, Laatta ja Kuoriteoria. Espoo: Otatieto, 1990 (Helsinki: Hakapaino). ISBN:951-672-111-7 (nid.).
- [12] Keski-Suomen Urethanieristys. (2011). Polyuretaanin ominaisuudet. Jyväskylä. Haettu 12.04.2011. Saatavilla: <http://www.urethanieristys.fi/index.php?page=3>.
- [13] Dr. K. J. Bel, Dr. A. C. Mueller. Wolverine Engineering Data Book II. Wolverine Tube, Inc. 2001.
- [14] Latif M. Jiji. Heat Conduction, Third Edition. Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., Chennai, India, 2009. ISBN: 978-3-642-01266-2.
- [15] Lena Jauhiainen. (2010). Teräsbetonisen reaktiotornin rakenteellinen yleissuunnittelu. Espoo. Teknillinen korkeakoulu.

- [16] T. Y. Lin. Design of prestressed concrete structures. New York : Wiley & Sons, 1963. 2. edition.
- [17] Luentomateriaalit. Kurssi Rakenteiden mekaniikka III, syksy 2011, Aalto yliopisto.
- [18] M. Rantamäki, R. Jääskeläinen & M. Tammirinne. Geotekniikka. Yhdeksäs muuttumaton painos. Vaasa : Otatieto 1990. Otatieto; 464. ISBN: 951-671-342-4.
- [19] Nils-Erik, Fagerholm. Termodynamiikka. Espoo: Otakustantamo, 1986. Otakustantamo; 479. ISBN:951-671-327-0.
- [20] Safarian, Segis S. Design and construction of silos and bunkers. New York : Van Nostrand, 1985. ISBN:0-442-27801-2.
- [21] Simo Hemilä, Juha Utriainen. Lämpöoppi. Otaniemi : Suomen fyysikkoseura, 1989. Suomen fyysikkoseuran julkaisuja; 3. ISBN:951-96117-2-X.
- [22] SFS-EN 1992-3. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 3: Nestesäiliöt ja siilot. 2006. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- [23] Teräsrakenneyhdistys. (2002). Paineettomien terässäiliöiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys r.y. ISBN 952-9683-26-X.
- [24] UGURAL, A. C. Stresses in plates and shells. New York : McGraw-Hill, 1981. ISBN:0-07-065730-0.
- [25] World Intellectual Property Organization. (2010). An open pressurised agitated reactor and a method for mixing gas and slurry with each other. International Publication Number: WO 2010/061054 A1.
- [26] Yunus A. Cengel. (2006). Heat and Mass Transfer A Practical Approach. Third edition. Reno .University of Nevada. ISBN-13:978-007-125739-8.

CBR-REAKTORIN TUULIKUORMAN MÄÄRITYS

(SFS-EN 1991-1-4 2005 mukaan)

Tuulennopeuden perusarvo:

$$v_b := 21 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Maastoluokka: 0

Rakennuksen korkeus:

$$z := 60 \cdot \text{m}$$

Nopeuspaineen perusarvo:

$$\rho := 1.23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$q_b := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0.271 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Alistuskerroin (pätee laakeassa maastossa):

$$c_e(z) := 4.1$$

(SFS-EN 1991-1-4 Kuva 4.2)

Puuskanopeuden paine korkeudella z:

$$q_p(z) := c_e(z) \cdot q_b$$

$$q_p := q_p(z) = 1.112 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Sylinterin tuulikuorma:

Ulkopuolinen halkaisija:

$$b := 6.25 \text{ m}$$

$$b_1 := 12.5 \text{ m}$$

Ilman kinemaattinen viskositeetti:

$$\nu := 15 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Tuulennopeuden huippuarvo korkeudella z_e :

$$z_e := z$$

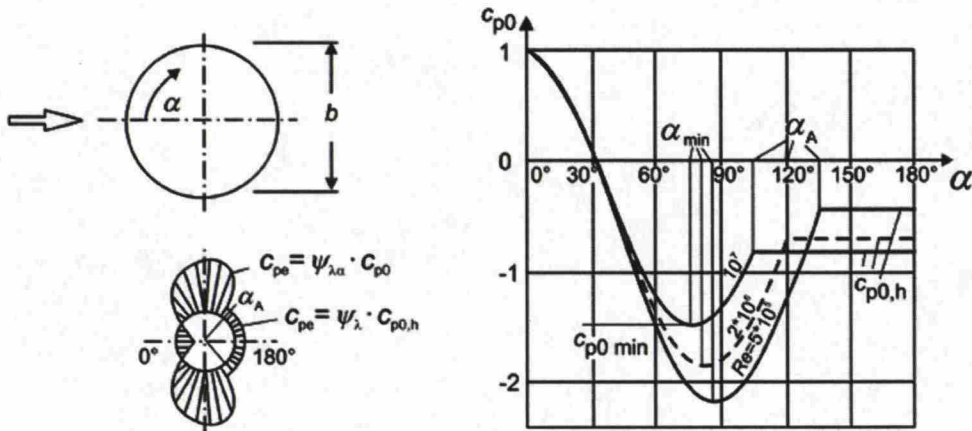
$$v(z_e) := \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}$$

$$v(z_e) = 42.522 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsin luku:

$$\text{Re} := \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = 1.772 \times 10^7$$

$$\text{Re}_1 := \frac{b_1 \cdot v(z_e)}{\nu} = 3.543 \times 10^7$$



Kuva 1. Paineen jakautuminen sylinterin ympärille eri Reynoldsin luvun arvoilla ja ilman päätevaikutusta. (SFS-EN 1991-1-4 Kuva 7.27)

Ekvivalentti karheus:

$$\frac{k}{b} < 5 \cdot 10^{-4} \quad \text{OK!} \quad k = 0.002 \dots 0.2 \text{ mm}$$

Rakenteen tehollinen hoikkuus: (SFS-EN 1991-1-4 Taulukko 7.16)

$$b \cdot 2.5 = 15.625 \text{ m} > b_1 = 12.5 \text{ m}$$

$$b \cdot 1.5 = 9.375 \text{ m} < b_1 = 12.5 \text{ m}$$

$$l := (60 - 18) \text{ m} = 42 \text{ m}$$

$$\text{kun korkeus} > 50 \text{ m} \quad \lambda_1 := \min\left(0.7 \frac{l}{b}, 70\right) = 4.704$$

$$\text{kun korkeus} < 15 \text{ m} \quad \lambda_2 := \min\left(\frac{l}{b}, 70\right) = 6.72$$

$$\lambda := \lambda_1 + \frac{(50 \text{ m} - l)}{(50 \text{ m} - 15 \text{ m})} \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) = 5.165$$

Päätevaikutuskerroin: (SFS-EN 1991-1-4 Kuva 7.36)

$$\varphi := 1$$

$$\psi_\lambda := 0.66$$

Reynoldsin luvun perusteella ja kuvan 1 mukaan:

$$\alpha_{\min} := 80$$

$$\alpha_A := 115$$

Ulkopuolinen painekerroin:

Kun:

$$\alpha := 0$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$c_{p0} := 1$$

$$c_{pe.0} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = 1$$

Kun:

$$\alpha := 30$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$c_{p0} := 0.1 \quad (\text{Kuva 1})$$

$$c_{pe.1} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = 0.1$$

Kun:

$$\alpha := 60$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$c_{p0} := -1.3 \quad (\text{Kuva 1})$$

$$c_{pe.2} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = -1.3$$

Kun:

$$\alpha := \alpha_{\min}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$c_{p0} := -1.6 \quad (\text{Kuva 1})$$

$$c_{pe.3} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = -1.6$$

Kun:

$$\alpha := 90$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = 0.966$$

$$c_{p0} := -1.5 \quad (\text{Kuva 1})$$

$$c_{pe.4} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = -1.449$$

Kun:

$$\alpha := \alpha_A$$

$$\psi_{\lambda\alpha} := \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \left[\psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \right] & \text{if } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda} & \text{otherwise} \end{cases}$$

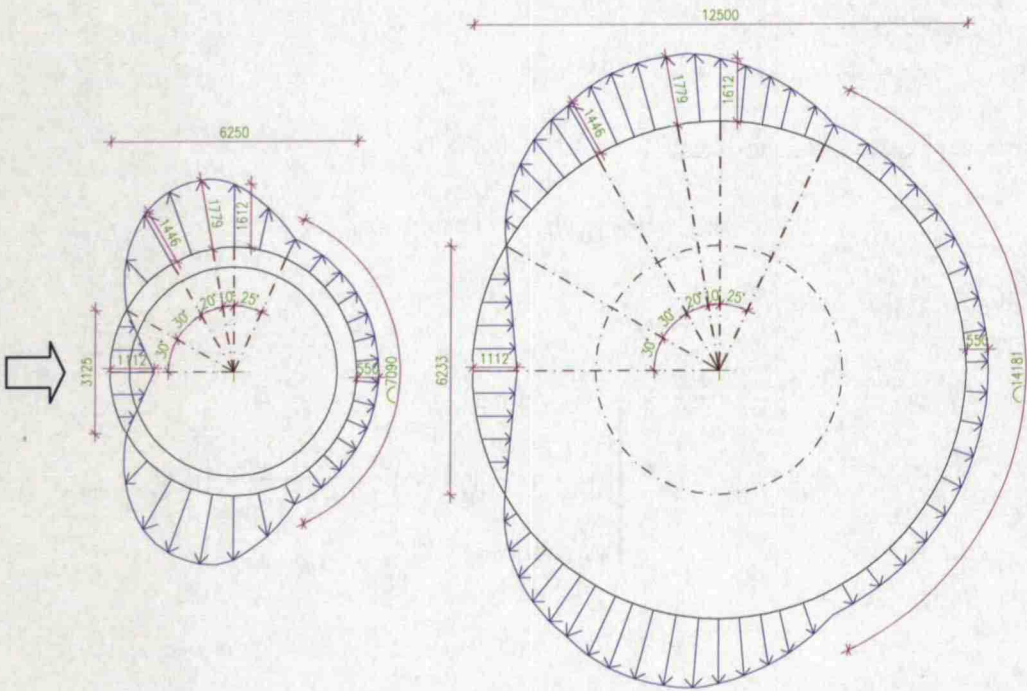
$$\psi_{\lambda\alpha} = 0.66$$

$$c_{p0} := -0.75 \quad (\text{Kuva 1})$$

$$c_{pe.5} := \psi_{\lambda\alpha} \cdot c_{p0} = -0.495$$

Yhteenveto painekertoimista ja ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine:

α (astetta):	Painekertoimet c_{pe} :	Ulkopintoihin vaikuttava tuulen paine w_e :
$\alpha_0 := 0$	$c_{pe.0} = 1$	$w_{e.0} := q_p \cdot c_{pe.0} = 1.112 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$\alpha_1 := 30$	$c_{pe.1} = 0.1$	$w_{e.1} := q_p \cdot c_{pe.1} = 0.111 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$\alpha_2 := 60$	$c_{pe.2} = -1.3$	$w_{e.2} := q_p \cdot c_{pe.2} = -1.446 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$\alpha_3 := \alpha_{\min}$	$c_{pe.3} = -1.6$	$w_{e.3} := q_p \cdot c_{pe.3} = -1.779 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$\alpha_4 := 90$	$c_{pe.4} = -1.449$	$w_{e.4} := q_p \cdot c_{pe.4} = -1.612 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$\alpha_5 := \alpha_A$	$c_{pe.5} = -0.495$	$w_{e.5} := q_p \cdot c_{pe.5} = -0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$



Kuva 2. Tuulikuorma N/m^2 , ulkomitat mm.

VARREN LÄMPÖTILAJAKAUMAN ANALYYTTINEN LASKENTA STATIONÄÄRISESSÄ TILASSA

Rakennetyyppi RT3-A2

Betonikerros $d_c := 400\text{mm}$ Lierion sisäsäde $r_s := 3.125\text{m}$

Seuraavat seinän kerrokset on lueteltu sisäkerroksesta lukien.

KERROS	SISÄSÄDE	PAKSUUS	LÄMMÖNJOHTAVUUS
1. Lujitemuovi	$r_1 := r_s$	$d_1 := 50\text{mm}$	$\lambda_1 := 0.3 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$
2. Mineraalivilla	$r_2 := r_1 + d_1 = 3.175\text{m}$	$d_2 := 100\text{mm}$	$\lambda_2 := 0.04 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$
3. Betoni	$r_3 := r_2 + d_2 = 3.275\text{m}$	$d_3 := d_c$	$\lambda_3 := 1.5 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$
4. Polyuretaani	$r_4 := r_3 + d_3 = 3.675\text{m}$	$d_4 := 50\text{mm}$	$\lambda_4 := 0.02 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$
Neljannen kerroksen ulkosäde	$r_5 := r_4 + d_4 = 3.725\text{m}$		

Lietteen ja seinän sisäkerroksen pinnan välinen lämmönsiirtokerroin: $h_{\text{im.is}} := 2407 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}^2}$

Ulkoilman ja seinän ulkokerroksen pinnan välinen lämmönsiirtokerroin: $h_{\text{em.es}} := 16.3 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}^2}$

Seinän pituus: $L := 42\text{m}$

$$R_{\text{conv.im}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_{\text{im.is}}} = 0.000001 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{syl.1}} := \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_1} = 0.000201 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{syl.2}} := \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_2} = 0.002938 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{syl.3}} := \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_3} = 0.000291 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{syl.4}} := \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_4} = 0.002560 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{conv.em}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_{\text{em.es}}} = 0.000074 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Seinän kokonaislämmönvastus:

$$R_{\text{total}} := R_{\text{conv.im}} + R_{\text{syl.1}} + R_{\text{syl.2}} + R_{\text{syl.3}} + R_{\text{syl.4}} + R_{\text{conv.em}} = 0.0061 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Alkulämpötila $T_a := 20 \cdot ^\circ\text{C}$

Lämpötila sisätilassa: $T_{im} := 104 \cdot ^\circ\text{C}$

Lämpötila ulkotilassa: $T_{em} := 20 \cdot ^\circ\text{C}$

Siirtyvä lämpömäärä seinän läpi: $Q_{syl} := \frac{T_{im} - T_{em}}{R_{total}} = 468150 \text{ W}$

Ensimmäisen kerroksen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötila:

$$T_1 := T_{im} - Q_{syl} \cdot R_{conv.im} = 103.993 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_2 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1}) = 101.216 \cdot ^\circ\text{C}$$

Toisen kerroksen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötila:

$$T_2 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1}) = 101.216 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_3 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1} + R_{syl.2}) = 60.526 \cdot ^\circ\text{C}$$

Kolmannen kerroksen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötila:

$$T_3 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1} + R_{syl.2}) = 60.526 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_4 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1} + R_{syl.2} + R_{syl.3}) = 56.494 \cdot ^\circ\text{C}$$

Neljännän kerroksen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötila:

$$T_4 = 56.494 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_5 := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1} + R_{syl.2} + R_{syl.3} + R_{syl.4}) = 21.03 \cdot ^\circ\text{C}$$

Tarkistus:

Ulkoilman lämpötila:

$$T_{em.inspection} := T_{im} - Q_{syl} \cdot (R_{conv.im} + R_{syl.1} + R_{syl.2} + R_{syl.3} + R_{syl.4} + R_{conv.em}) = 20 \cdot ^\circ\text{C}$$

Betonikerroksen

Sisäpinnan lämpötila

$$\Delta T_{c.is} := T_3 = 60.526 \cdot ^\circ\text{C}$$

Ulkopinnan lämpötila

$$\Delta T_{c.es} := T_4 = 56.494 \cdot ^\circ\text{C}$$

Tasaisen lämötilan muutos

$$\Delta T_{c.cl} := \frac{\Delta T_{c.is} + \Delta T_{c.es}}{2} - T_a = 38.51 \cdot ^\circ\text{C}$$

Lämpötilaero pintojen välissä

$$\Delta T_c := \Delta T_{c.is} - \Delta T_{c.es} = 4.03 \cdot ^\circ\text{C}$$

Gradientti

$$T_{gradient} := \frac{\Delta T_c}{d_c} = -10.08 \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$$

VARREN JA YLÄSÄILIÖN KUORMAT**REAKTORITORNIN VARREN KUORMIEN MÄÄRITYS****REAKTORITORNIN OSIEN MITAT****YLÄOSA**

Korkeus	$h_{\text{part.1}} := 18\text{m}$
Lujitemuovin sisäsäde	$r_{\text{part.1_pl_in}} := 6.25\text{m}$
Lujitemuovin paksuus	$t_{\text{part.1_pl}} := 30\text{mm}$
Lujitemuovin ulkosäde	$r_{\text{part.1_pl_ex}} := r_{\text{part.1_pl_in}} + t_{\text{part.1_pl}} = 6.28\text{m}$
Lujitemuovin keskisäde	$r_{\text{part.1_pl_m}} := \frac{r_{\text{part.1_pl_ex}} + r_{\text{part.1_pl_in}}}{2} = 6.265\text{m}$

VARSI

Korkeus	$h_{\text{part.2}} := 42\text{m}$
Lujitemuovin sisäsäde	$r_{\text{part.2_pl_in}} := 3.125\text{m}$
Lujitemuovin paksuus	$t_{\text{part.2_pl}} := 50\text{mm}$
Lujitemuovin ulkosäde	$r_{\text{part.2_pl_ex}} := r_{\text{part.2_pl_in}} + t_{\text{part.2_pl}} = 3.175\text{m}$
Lujitemuovin keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_pl_m}} := \frac{r_{\text{part.2_pl_in}} + r_{\text{part.2_pl_ex}}}{2} = 3.15\text{m}$
Mineraalivillan sisäsäde	$r_{\text{part.2_mv_in}} := r_{\text{part.2_pl_ex}} = 3.175\text{m}$
Mineraalivillan paksuus	$t_{\text{part.2_mv}} := 100\text{mm}$
Mineraalivillan ulkosäde	$r_{\text{part.2_mv_ex}} := r_{\text{part.2_mv_in}} + t_{\text{part.2_mv}} = 3.275\text{m}$
Mineraalivillan keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_mv_m}} := \frac{r_{\text{part.2_mv_in}} + r_{\text{part.2_mv_ex}}}{2} = 3.225\text{m}$
Betonin sisäsäde	$r_{\text{part.2_c_in}} := r_{\text{part.2_mv_ex}} = 3.275\text{m}$
Betonin paksuus	$t_{\text{part.2_c}} := 400\text{mm}$
Betonin ulkosäde	$r_{\text{part.2_c_ex}} := r_{\text{part.2_c_in}} + t_{\text{part.2_c}} = 3.675\text{m}$
Mineraalivillan keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_c_m}} := \frac{r_{\text{part.2_c_in}} + r_{\text{part.2_c_ex}}}{2} = 3.475\text{m}$
Lujitemuovin sisäsäde	$r_{\text{part.2_pu_in}} := r_{\text{part.2_c_ex}} = 3.675\text{m}$
Lujitemuovin paksuus	$t_{\text{part.2_pu}} := 50\text{mm}$
Lujitemuovin ulkosäde	$r_{\text{part.2_pu_ex}} := r_{\text{part.2_pu_in}} + t_{\text{part.2_pu}} = 3.725\text{m}$
Mineraalivillan keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_pu_m}} := \frac{r_{\text{part.2_pu_in}} + r_{\text{part.2_pu_ex}}}{2} = 3.7\text{m}$

MATERIAALIT

Maanvetovoima

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

BETONI

Ominaispuristuslujuus

$$f_{ck} := 35 \text{MPa}$$

Ominaisvetolujuus

$$f_{ctk} := 2.2 \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 3.2 \text{MPa}$$

Kimmomoduuli

$$E_{cm} := 34 \text{GPa}$$

Lämpölaajenemiskerroin [1/C]

$$\alpha_{betoni} := 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

$$\alpha_{ct} := 1.0$$

Tiheys

$$\gamma_{con} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Betonin varmuuskerroin

$$\gamma_c := 1.5$$

BETONITERÄS

Ominaisvetolujuus

$$f_{sk} := 500 \text{MPa}$$

Kimmomoduuli

$$E_s := 210 \text{GPa}$$

Varmuuskerroin

$$\gamma_s := 1.15$$

LUJITEMUOVI

Tiheys (kilo)

$$\rho_{pl} := 1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tiheys (kN)

$$\gamma_{pl} := \rho_{pl} \cdot g = 18.142 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

MINERAALIVILLA

Tiheys (kilo)

$$\rho_{mv} := 60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tiheys (kN)

$$\gamma_{mv} := \rho_{mv} \cdot g = 0.588 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

POLYURETAANI

Tiheys (kilo)

$$\rho_{pu} := 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tiheys (kN)

$$\gamma_{pu} := \rho_{pu} \cdot g = 0.294 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

EI-RAKENTEELLISET KUORMAT**LIETE**

Tiheys (kilo)

$$\rho_{\text{liete}} := 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tiheys (kN)

$$\gamma_{\text{liete}} := \rho_{\text{liete}} \cdot g = 14.71 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

LUMIKUORMA

Lumikuorma/huoltokuorma

$$q_{\text{lumi.m2}} := 1.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

TUULIKUORMA

Painekuorma

$$q_{\text{tuuli.paine}} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Imukuorma

$$q_{\text{tuuli.imu}} := 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

LÄMPÖTILA

Sisälämpötila

$$T_s = 104 \cdot \text{C}$$

Ulkolämpötila

$$T_u = -20 \text{C}$$

KUORMAN OSAVARMUUSKERTOIMET

Pysyvät kuormat (murtorajatilassa)

$$\gamma_g := 1.35$$

Muuttuvat kuormat (murtorajatilassa)

$$\gamma_q := 1.5$$

Pysyvät kuormat (käyttöraajatilassa)

$$\gamma_{gk} := 1$$

Muuttuvat kuormat (käyttöraajatilassa)

$$\gamma_{qk} := 1$$

BETONIKERROKSELLE TULEVAT KUORMAT**YLÄOSAN KUORMAT (PART 1)**

Lujitemuovin pinta-ala

$$A_{\text{part.1.pl}} := 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{part.1.pl.m}} \cdot h_{\text{part.1}} = 708.555 \text{ m}^2$$

Lujitemuovikuorman paino

$$g_{\text{part.1.pl}} := A_{\text{part.1.pl}} \cdot t_{\text{part.1.pl}} \cdot \gamma_{\text{pl}} = 385.644 \cdot \text{kN}$$

Lujitemuovikuorma/metri

$$g_{\text{part.1.pl.m}} := \frac{g_{\text{part.1.pl}}}{(2 \cdot r_{\text{part.2.c.m}} \cdot \pi)} = 17.663 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Muut pysyvät kuormat

$$g_0 := 50 \text{ kN}$$

Muut pysyvät kuormat / metri	$g_{0.m} := \frac{g_0}{(2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi)} = 2.29 \cdot \frac{kN}{m}$
Suoraan perustuksiin	$g_{part.1_ylim.} := \pi \cdot r_{part.2_pl_in}^2 \cdot \gamma_{liete} \cdot h_{part.1} = 8.12 \cdot MN$
Lietteen paino (lieriö)	$g_{part.1_liete} := \pi \cdot r_{part.1_pl_in}^2 \cdot \gamma_{liete} \cdot h_{part.1} = 32 \cdot MN$
Lietekuorma/metri	$g_{part.1_liete.m} := \frac{g_{part.1_liete} - g_{part.1_ylim.}}{2 \cdot (2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi)} = 558.073 \cdot \frac{kN}{m}$
Lumikuorman paino	$q_{lumi} := \pi \cdot r_{part.1_pl_in}^2 \cdot q_{lumi.m2} = 147.26 \cdot kN$
Lumikuorma/metri	$q_{lumi.m} := \frac{q_{lumi}}{2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi} = 6.745 \cdot \frac{kN}{m}$
Tuulikuorman resultantti	$Q_{part.1} := (6m \cdot q_{tuuli_paine} + 14.2m \cdot q_{tuuli_imu}) \cdot h_{part.1}$ $Q_{part.1} = 248.58 \cdot kN$

VARREN RAKENNEKUORMAT (PART 2)

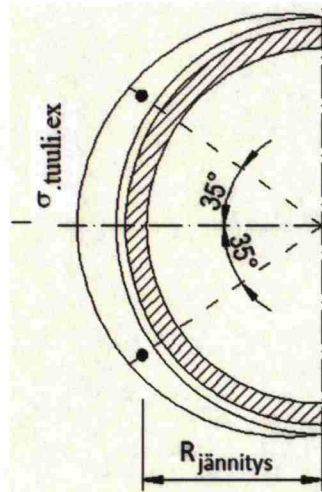
Lujitemuovin pinta-ala	$A_{part.2_pl} := 2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_pl_m} \cdot h_{part.2} = 831.265 \cdot m^2$
Lujitemuovikuorman paino	$g_{part.2_pl} := A_{part.2_pl} \cdot t_{part.2_pl} \cdot \gamma_{pl} = 754.053 \cdot kN$
Lujitemuovikuorma/metri	$g_{part.2_pl.m} := \frac{g_{part.2_pl}}{(2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi)} = 34.536 \cdot \frac{kN}{m}$
Mineraalivillan pinta-ala	$A_{part.2_mv} := 2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_mv_m} \cdot h_{part.2} = 851.057 \cdot m^2$
Mineraalivillan paino	$g_{part.2_mv} := A_{part.2_mv} \cdot t_{part.2_mv} \cdot \gamma_{mv} = 50.076 \cdot kN$
Mineraalivillakuorma/metri	$g_{part.2_mv.m} := \frac{g_{part.2_mv}}{(2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi)} = 2.293 \cdot \frac{kN}{m}$
Betonin pinta-ala	$A_{part.2_c} := 2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_c_m} \cdot h_{part.2} = 917.031 \cdot m^2$
Betonin paino	$g_{part.2_c} := A_{part.2_c} \cdot t_{part.2_c} \cdot \gamma_{con} = 9170 \cdot kN$
Betonikuorma/metri	$g_{part.2_c.m} := \frac{g_{part.2_c}}{(2 \cdot r_{part.2_c_m} \cdot \pi)} = 420 \cdot \frac{kN}{m}$
Polyuretaanin pinta-ala	$A_{part.2_pu} := 2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_pu_m} \cdot h_{part.2} = 976.407 \cdot m^2$
Polyuretaanin paino	$g_{part.2_pu} := A_{part.2_pu} \cdot t_{part.2_pu} \cdot \gamma_{pu} = 14.363 \cdot kN$

Polyuretaanikuorma/metri	$g_{\text{part.2_pu.m}} := \frac{g_{\text{part.2_pu}}}{(2 \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot \pi)} = 0.658 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Lietekuorman paino	$g_{\text{part.2_liete}} := \pi \cdot r_{\text{part.2_pl_in}}^2 \cdot \gamma_{\text{liete}} \cdot h_{\text{part.2}} = 18954.45 \cdot \text{kN}$
Lietekuorma/metri	$g_{\text{part.2_liete.m}} := \frac{g_{\text{part.2_liete}}}{(2 \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot \pi)} = 868.113 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

VOIMASUUREET JA JÄNNITYKSET TUULIKUORMASTA VARRELLA

Tuulikuorman resultantti (yläosa)	$Q_{\text{part.1}} = 248.58 \cdot \text{kN}$
Varsiosan yläpään taivutusmomentti tuulikuormasta	$M_{\text{tuuli.part2(s)}} := Q_{\text{part.1}} \cdot \left(\frac{h_{\text{part.1}}}{2} + s \right)$
Tuulikuorman resultantti (varsi)	$Q_{\text{part.2(s)}} := (3\text{m} \cdot q_{\text{tuuli_paine}} + 7.1\text{m} \cdot q_{\text{tuuli_imu}}) \cdot s$
Tuulikuorman taivutusmomentti varsiosalla	$M_{\text{tuuli(s)}} := M_{\text{tuuli.part2(s)}} + Q_{\text{part.2(s)}} \cdot \frac{s}{2}$
	$M_{\text{tuuli(42m)}} = 18768 \cdot \text{kNm}$
Taivutusmomentti (murtorajatila)	$M_{\text{tuuli.Ed(s)}} := \gamma_q \cdot M_{\text{tuuli(s)}}$

Suurin jännitys $\sigma_{\text{tuuli.ex}}$ syntyy tomin uloimpaan reunaan.



Koska jännityspinta muodostaa kaarevan kolmion, niin jännitysten resultantti sijaitsee keskipisteestä mitattuna

	$R_{\text{jännitys}} := r_{\text{part.2_c_m}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{180} \cdot 35\right) = 2.847 \text{ m}$
ja momenttivarsi on	$Z_{\text{jännitys}} := 2 \cdot R_{\text{jännitys}} = 5.693 \text{ m}$

Jännitys tuulikuormasta betonirakenteelle

Keskimääräinen jännitys keskilinjalla $\sigma_{\text{tuuli.m}} = \frac{\sigma_{\text{tuuli.in}} + \sigma_{\text{tuuli.ex}}}{2}$

Jännitusalueen voimaresultantti $F_{\sigma.\text{tuuli}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{tuuli.m}} \cdot t_{\text{part.2_c}} \cdot \frac{180}{360} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{part.2_c_m}}$

$$F_{\sigma.\text{tuuli}} \cdot Z_{\text{jännitys}} = M_{\text{tuuli}}$$

$$\sigma_{\text{tuuli.m}}(s) := \frac{M_{\text{tuuli}}(s)}{\left(\frac{1}{2} \cdot t_{\text{part.2_c}} \cdot \frac{180}{360} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot Z_{\text{jännitys}} \right)}$$

Voimaresultantti

$$F_{\sigma.\text{tuuli}}(s) := \frac{1}{2} \sigma_{\text{tuuli.m}}(s) \cdot t_{\text{part.2_c}} \cdot \frac{180}{360} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{part.2_c_m}}$$

$$F_{\sigma.\text{tuuli}}(42\text{m}) = 3296.581 \cdot \text{kN}$$

Betonin ulkolinjan jännitys

$$\sigma_{\text{tuuli.ex}}(s) := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{tuuli.m}}(s) \cdot r_{\text{part.2_c_ex}}}{r_{\text{part.2_c_ex}} + r_{\text{part.2_c_in}}}$$

Voimasuureet tuulikuormasta varsiosan yläpäähän

Yläsäiliötä rasittavasta tuulikuormasta aiheutuva pystysuuntainen kuorma/metri betoni-kerrokselle ja tasaisesti oletetun alueen pituuden määrittäminen abaqus-ohjelmaa varten.

Taivutusmomentti varsiosan
yläpäässä tuulikuormasta

$$M_{\text{tuuli}}(0\text{m}) = 2237 \cdot \text{kNm}$$

Maksimijännitys betonikerroksen
keskilinjassa

$$\sigma_{\text{tuuli.m}}(0) = 0.18 \cdot \text{MPa}$$

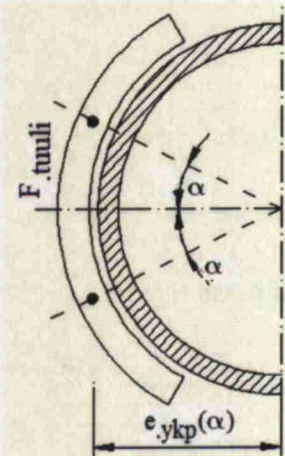
$$F_{\text{tuuli_metri}}(s) := \sigma_{\text{tuuli.m}}(s) \cdot t_{\text{part.2_c}}$$

Maksimi pystysuuntainen
kuorma/metri

$$F_{\text{tuuli_metri}}(0) = 71.992 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ympyräkaariprofiilin painopiste

$$e_{\text{ykp}}(\alpha) := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot \alpha\right)}{\frac{\pi}{180} \cdot \alpha} r_{\text{part.2_c_m}}$$



Jaetaan pystykuorma tietylle ympyräkaaren sektorille, niin että betonissa vallitsee keskimääräinen jännitystila ja taivutusmomentti tuulikuormasta pysyy suhteellisen oikeissa arvoissa.

$$M_{tuuli}(\alpha, s) := F_{tuuli_metri}(s) \cdot \frac{2 \cdot \alpha}{360} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_c_m} \cdot 2 \cdot e_{ykp}(\alpha)$$

$$M_{tuuli}(40, 0) = 2235 \cdot \text{kNm}$$

Leikkausvoima varrella
tuulikuormasta

$$Q_{varsi}(s) := \frac{Q_{part.1} + Q_{part.2}(s)}{2 \cdot \pi \cdot r_{part.2_c_m}}$$

$$Q_{varsi}(0m) = 11.385 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

VAPAASTI TUETTU VARS

VOIMASUUREET VAPAASTI TUETUSSA VARSIOSASSA OMASTA PAINOSTA, HYDROSTAATTISESTA PAINEESTA JA LÄMPÖKUORMASTA

Ajatellaan varsiosan juuri jäykästi tuetuksi. Torni on riittävän korkea, joten yläpään reunahäriö ei ulotu juureen.

Varsiosan geometriset tiedot ja ominaisuudet

Betoniseinän paksuus	$t_{\text{part.2_c}} = 400 \text{ mm}$
Tomin betonikerroksen keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_c_m}} = 3.425 \text{ m}$
Yläosan korkeus	$h_{\text{part.1}} = 18 \text{ m}$
Varsiosan korkeus	$h_{\text{part.2}} = 42 \text{ m}$
	$H_{\text{torni}} := h_{\text{part.1}} + h_{\text{part.2}} = 60 \text{ m}$
Poissonin luku	$\nu := 0.2$
Vaimennusluku	$\beta := \frac{4 \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{(t_{\text{part.2_c}})^2 \cdot r_{\text{part.2_c_m}}^2}}}{1} = 1.113 \frac{1}{\text{m}}$
Betonin lämpötilaajenemiskerroin	$\alpha_{\text{con}} := 1 \cdot 10^{-5}$
Taivutusjäykkyys	$D := \frac{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$

Varsiosan oma paino ja hydrostaattinen paine

Yläpuolisten rakenteiden metrikuorma	$g_{\text{part1_pysty}} := -1537.007 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Lietteen paino	$\gamma_{\text{liete}} = 14.71 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Betonin paino	$\gamma_{\text{con}} = 25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Nesteen paine varsiosan yläpäässä	$p_{\text{part.2_yläpää}} := \gamma_{\text{liete}} \cdot h_{\text{part.1}}$ $p_{\text{part.2_yläpää}} = 264.78 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Varsiosan aksiaalinen kuorma oma paino	$q_{\text{s_seina}} := \left(\gamma_{\text{con}} \cdot t_{\text{part.2_c}} + \gamma_{\text{mv}} \cdot t_{\text{part.2_mv}} \dots \right. \\ \left. + \gamma_{\text{pl}} \cdot t_{\text{part.2_pl}} + \gamma_{\text{pu}} \cdot t_{\text{part.2_pu}} \right)$

Voimasuureiden määrittäminen (kuormitus on pyörähdysymmetrinen)**Pystysuorille kuormille on olemassa ehto**

$$r \cdot N_s = - \int (q_s - q_r \cdot \cot(\phi)) r ds + C$$

$$r \cdot N_s = - \int q_s r ds + C$$

$$r \cdot N_s(s) = -r \cdot s \cdot q_{s_seina} + C_1$$

$$N_{s_K}(s) = -s \cdot q_{s_seina} + \frac{C_1}{r}$$

$$N_{s_K}(42m) = \frac{C_1}{r} = g_{part1_pysty}$$

$$C_1 := g_{part1_pysty} \cdot r_{part.2_c_m}$$

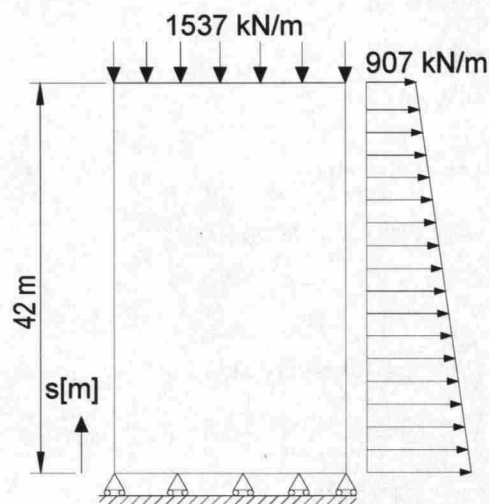
$$N_{s_K}(s) := (s - h_{part.2}) \cdot q_{s_seina} + \frac{C_1}{r_{part.2_c_m}}$$

Nesteen paine varsiosan korkeuden funktiona

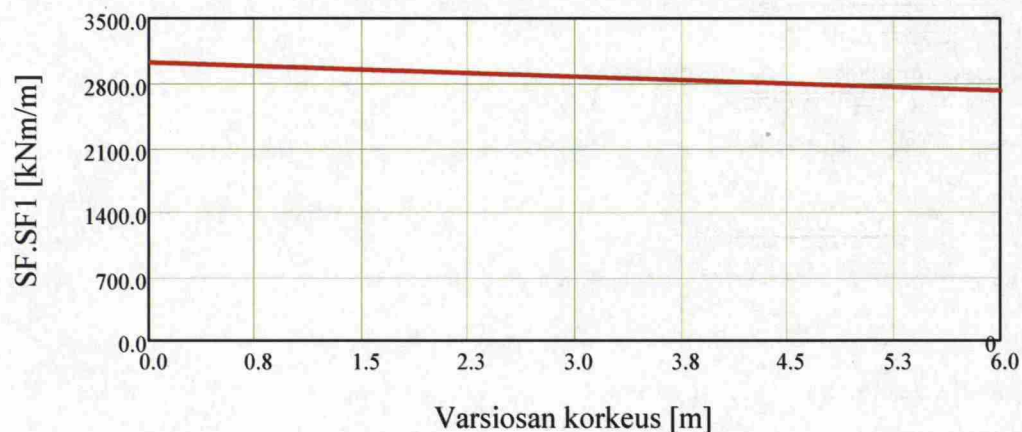
$$P_{r_neste}(s) := P_{part.2_yläpää} + \gamma_{liete} \cdot (42m - s)$$

Säteensuuntainen normaalivoima varsiosan korkeuden funktiona

$$N_{\theta}(s) := r_{part.2_c_m} \cdot P_{r_neste}(s)$$



Kehänsuuntainen normaalivoima



Lämpökuorma: (Talvi)**Lämpötilat**

Alkulämpötila

$$T_a := 20$$

Sisäpinnan lämpötila

$$T_s := 39.8$$

Ulkopinnan lämpötila

$$T_u := 33.9$$

Lämpötilan muutos

$$T_0 := \frac{T_s + T_u}{2} - T_a = 16.8$$

Lämpötilaero (lämpögradientti)

$$\Delta T := T_s - T_u = 5.9$$

$$\Delta T_{\text{grad}} := -\frac{\Delta T}{t_{\text{part.2_c}}} = -14.75 \frac{1}{\text{m}}$$

Homogeeninen ratkaisu

$$w_{0,T}(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (C_1 \cdot \cos(\beta \cdot s) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot s))$$

Yksityisratkaisu

$$w_{1,T}(x) := -\frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Reunaehdot :

$$w_T(0) = \alpha_{\text{con}} \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot T_0$$

$$\frac{d^2}{dx^2} w_T(0) = M_x(0) = 0$$

Kokonaisratkaisu:

$$w_T(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (A_{1,T} \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_{2,T} \cdot \sin(\beta \cdot s)) + \frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Säteensuuntainen siirtymä on estetty: $w_T(0) = 0$

$$A_{1,T} + \frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4} = \alpha_{\text{con}} \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot T_0$$

$$A_{1,T} := -\frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4} + \alpha_{\text{con}} \cdot r_{\text{part.2_c_m}} \cdot T_0 = 0 \cdot \text{mm}$$

Käyrästymä on nolla: $\frac{d^2}{dx^2} w_T(0) = 0$

$$\frac{d}{ds} w_T(s) = -\beta \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [A_{1,T} \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s)) + A_{2,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s))] = 0$$

$$\frac{d^2}{ds^2}w_T(s) = \beta^2 \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [A_{1,T} \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s)) + A_{2,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s))] \dots$$

$$+ (-\beta) \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [-\beta \cdot A_{1,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) + \beta \cdot \cos(\beta \cdot s)) + A_{2,T} \cdot (\beta \cdot \cos(\beta \cdot s) + \beta \cdot \sin(\beta \cdot s))]$$

$$\frac{d^2}{ds^2}w_T(s) = \beta^2 \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [A_{1,T} \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s)) + A_{2,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s))] \dots$$

$$+ \beta^2 \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [A_{1,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s)) - A_{2,T} \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s))]$$

$$\frac{d^2}{ds^2}w_T(0) = 2 \cdot \beta^2 \cdot A_{2,T}$$

Taivutusmomentti $M_{x,T}$ on juuressa nolla, koska kiertymä on vapaa:

$$M_{x,T}(0) = -D \cdot \left[\frac{d^2}{dx^2}w_T(0) - \frac{\alpha_{con} \cdot (1 + \nu) \cdot \Delta T}{t_{part.2_c}} \right]$$

$$\frac{d^2}{ds^2}w_T(0) = (1 + \nu) \cdot \frac{\alpha_{con} \cdot \Delta T}{t_{part.2_c}}$$

Tuntemattoman $A_{2,T}$ ratkaisu:

$$\frac{d^2}{ds^2}w_T(0) = -\beta^2 \cdot A_{2,T}$$

$$A_{2,T} = -\frac{\frac{d^2}{ds^2}w_T(0)}{2 \cdot \beta^2}$$

$$A_{2,T} := -\left[(1 + \nu) \cdot \frac{\alpha_{con} \cdot \Delta T}{2 \cdot \beta^2 \cdot t_{part.2_c}} \right] = -0.071 \cdot \text{mm}$$

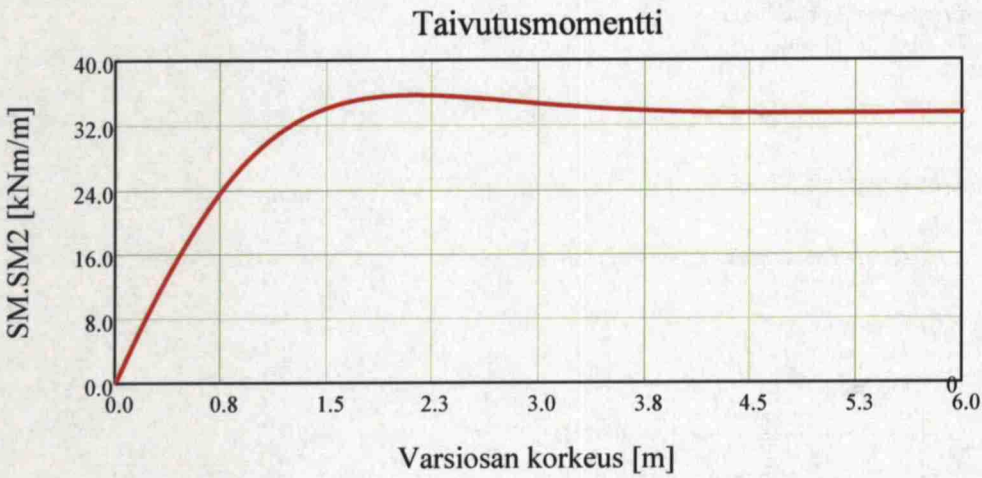
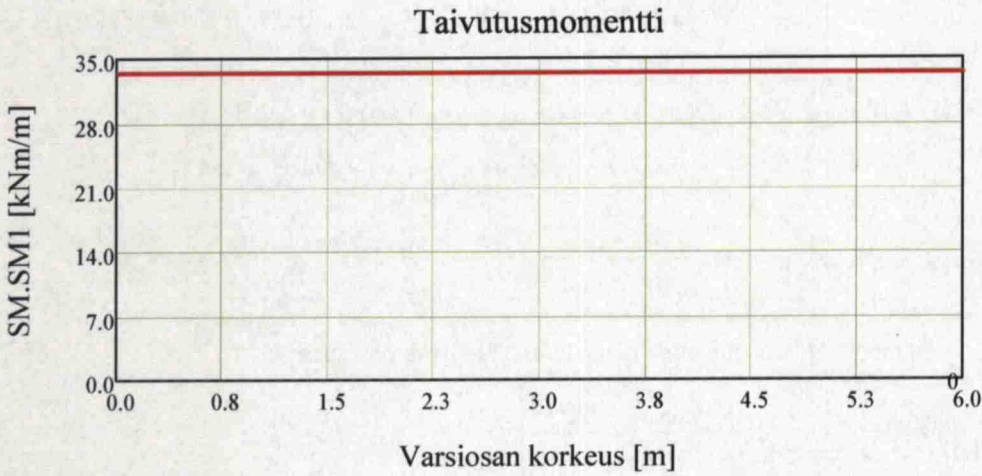
Varsiosan säteensuuntainen siirtymä varsiosan korkeuden funktiona:

$$w_T(x) := e^{-\beta \cdot x} \cdot (A_{1,T} \cdot \cos(\beta \cdot x) + A_{2,T} \cdot \sin(\beta \cdot x)) + \frac{t_{part.2_c} \cdot E_{cm} \cdot \alpha_{con} \cdot T_0}{r_{part.2_c_m} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Taivutusmomentit lämpökuormasta varsiosan korkeuden funktiona:

$$M_{x,T}(x) := -D \cdot \left[\frac{d^2}{dx^2}w_T(x) - \frac{\alpha_{con} \cdot (1 + \nu) \cdot \Delta T}{t_{part.2_c}} \right]$$

$$M_{\theta,T}(s) := \frac{E_{cm} \cdot \alpha_{con} \cdot \Delta T \cdot t_{part.2_c}^2}{12 \cdot (1 - \nu)}$$



JÄYKÄSTI TUETTU VARS

VOIMASUUREET JÄYKÄSTI TUETUSSA VARSIOSASSA OMASTA PAINOSTA, HYDROSTAATTISESTA PAINEESTA JA LÄMPÖKUORMASTA

Ajatellaan varsiosan juuri jäykästi tuetuksi. Torni on riittävän korkea, joten yläpään reunahäriö ei ulotu juureen.

Varsiosan geometriset tiedot ja ominaisuudet

Betoniseinän paksuus	$t_{\text{part.2_c}} = 400 \cdot \text{mm}$
Tornin betonikerroksen keskimääräinen säde	$r_{\text{part.2_c_m}} = 3.425 \text{ m}$
Yläosan korkeus	$h_{\text{part.1}} = 18 \text{ m}$
Varsiosan korkeus	$h_{\text{part.2}} = 42 \text{ m}$
	$H_{\text{torni}} := h_{\text{part.1}} + h_{\text{part.2}} = 60 \text{ m}$
Poissonin luku	$\nu := 0.2$
Vaimennusluku	$\beta := \frac{4 \cdot \frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{(t_{\text{part.2_c}})^2 \cdot r_{\text{part.2_c_m}}^2}}{\sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{(t_{\text{part.2_c}})^2 \cdot r_{\text{part.2_c_m}}^2}}} = 1.113 \frac{1}{\text{m}}$
Betonin lämpötilaajanemiskerroin	$\alpha_{\text{con}} := 1 \cdot 10^{-5}$
Taivutusjäykkyys	$D := \frac{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$

Varsiosan oma paino ja hydrostaattinen paine

Yläpuolisten rakenteiden metrikuorma	$g_{\text{part1_pysty}} := -1537.007 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Lietteen paino	$\gamma_{\text{liete}} = 14.71 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Betonin paino	$\gamma_{\text{con}} = 25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Nesteen paine varsiosan yläpäässä	$p_{\text{part.2_yläpää}} := \gamma_{\text{liete}} \cdot h_{\text{part.1}}$ $p_{\text{part.2_yläpää}} = 264.78 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Varsiosan aksiaalinen kuorma oma paino	$q_{\text{s_seina}} := \left(\gamma_{\text{con}} \cdot t_{\text{part.2_c}} + \gamma_{\text{mv}} \cdot t_{\text{part.2_mv}} \dots \right. \\ \left. + \gamma_{\text{pl}} \cdot t_{\text{part.2_pl}} + \gamma_{\text{pu}} \cdot t_{\text{part.2_pu}} \right)$

Voimasuureiden määrittäminen (kuormitus on pyörähdysymmetrinen)

Pystysuorille kuormille on olemassa ehto

$$r \cdot N_s = - \int (q_s - q_r \cdot \cot(\phi)) r \, ds + C$$

$$r \cdot N_s = - \int q_s r \, ds + C$$

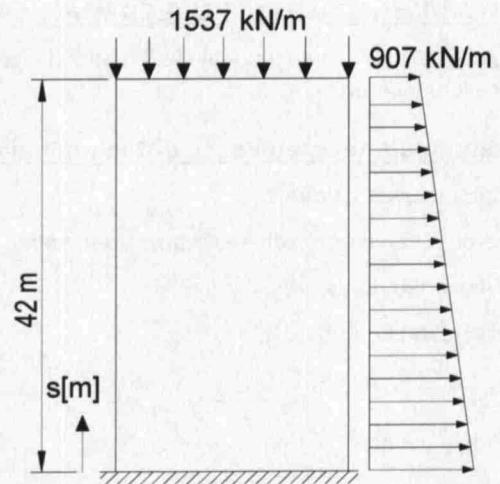
$$r \cdot N_s(s) = -r \cdot s \cdot q_{s_seina} + C_1$$

$$N_{s_K}(s) = -s \cdot q_{s_seina} + \frac{C_1}{r}$$

$$N_{s_K}(42\text{m}) = \frac{C_1}{r} = g_{\text{part1_pysty}}$$

$$C_1 := g_{\text{part1_pysty}} \cdot r_{\text{part.2_c_m}}$$

$$N_{s_K}(s) := (s - h_{\text{part.2}}) \cdot q_{s_seina} + \frac{C_1}{r_{\text{part.2_c_m}}}$$



Homogeeninen ratkaisu

$$w_0(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (A_1 \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_2 \cdot \sin(\beta \cdot s))$$

Yksityisratkaisu

$$w_1(s) = \frac{r^2}{E \cdot t} \cdot \left(p_r - \frac{\nu}{r} N_s \right)$$

$$w_1(s) := \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot (H_{\text{torni}} - s) - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} N_{s_K}(s) \right]$$

Reunaehdot

$$w(0) = 0 \quad \frac{d}{ds} w(0) = 0$$

Kokonaisratkaisu

$$w(s) = w_0(s) + w_1(s)$$

$$w(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (A_1 \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_2 \cdot \sin(\beta \cdot s)) \dots$$

$$+ \left[\frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot (H_{\text{torni}} - s) - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} N_{s_K}(s) \right] \right]$$

Säteen suuntainen siirtymä on nolla $w(0) = 0$

$$A_1 + \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot H_{\text{torni}} - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} \left(h_{\text{part.2}} \cdot q_{\text{s_seina}} + \frac{C_1}{r_{\text{part.2_c_m}}} \right) \right] = 0$$

$$A_1 := \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot H_{\text{torni}} - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} \left(h_{\text{part.2}} \cdot q_{\text{s_seina}} + \frac{C_1}{r_{\text{part.2_c_m}}} \right) \right] = -0.816 \cdot \text{mm}$$

$$\underline{A_1} := \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot (H_{\text{torni}} - 0) - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} N_{\text{s_K}}(0) \right] = -0.862 \cdot \text{mm}$$

Kiertymä juuressa estetty: $\frac{d}{ds} w(0) = 0$

Kokonaisratkaisun ensimmäinen derivaatta

$$\frac{d}{ds} w(s) = -\beta \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot \left[A_1 \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s)) + A_2 \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s)) \right] \dots$$

$$+ \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left(-\gamma_{\text{liete}} - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} q_{\text{s_seina}} \right)$$

$$-\beta \cdot (A_1 - A_2) - \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left(\gamma_{\text{liete}} + \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} q_{\text{s_seina}} \right) = 0$$

$$A_2 := A_1 - \frac{\frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left(\gamma_{\text{liete}} + \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} q_{\text{s_seina}} \right)}{-\beta} = -0.85 \cdot \text{mm}$$

Täten varsiosan säteensuuntainen siirtymä (kokonaisratkaisu) tomin korkeuden funktiona:

$$w(s) := e^{-\beta \cdot s} \cdot \left(A_1 \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_2 \cdot \sin(\beta \cdot s) \right) \dots$$

$$+ \frac{r_{\text{part.2_c_m}}^2}{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}} \cdot \left[\gamma_{\text{liete}} \cdot (H_{\text{torni}} - s) - \frac{\nu}{r_{\text{part.2_c_m}}} N_{\text{s_K}}(s) \right]$$

Voimasuureet lieriön korkeuden funktiona:

$$N_{\theta}(s) := \nu \cdot N_{\text{s_K}}(s) + \frac{E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}}}{r_{\text{part.2_c_m}}} \cdot w(s)$$

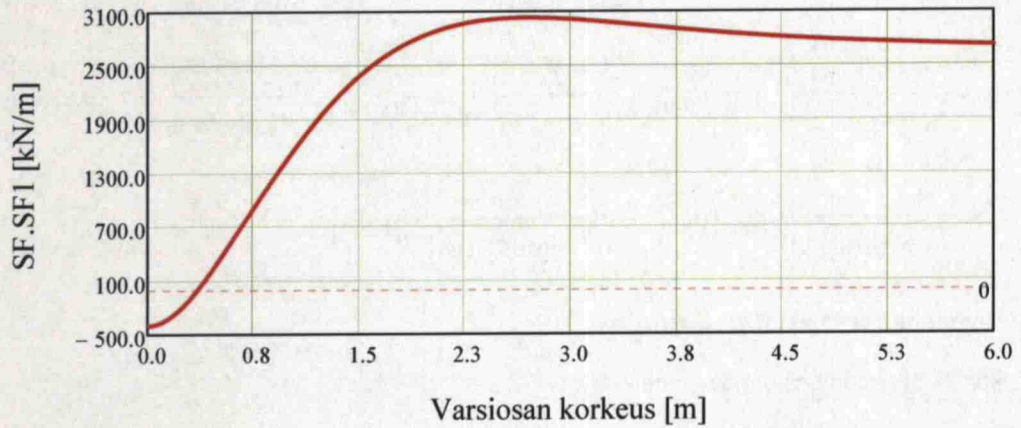
$$M_X(s) := -D \cdot \frac{d^2}{ds^2} w(s)$$

$$M_{\theta}(s) := \nu \cdot M_X(s)$$

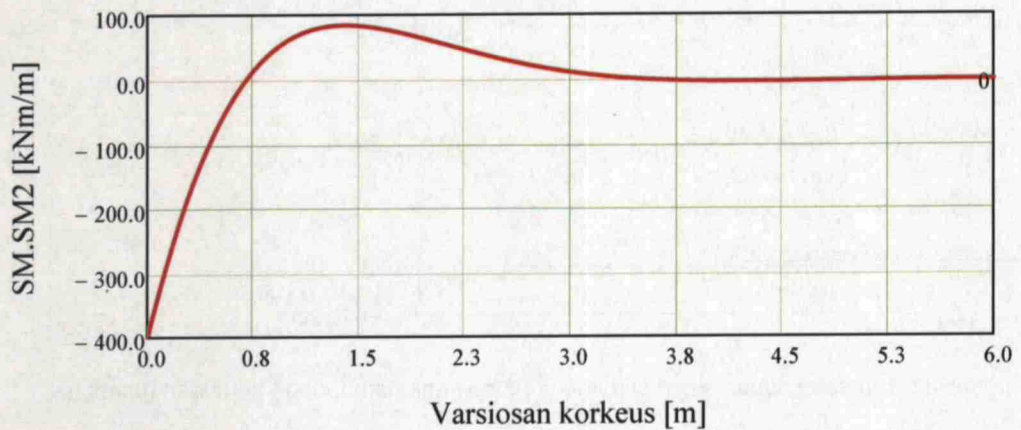
$$Q_X(s) := \frac{d}{ds} M_X(s)$$

Omasta painosta ja hydrostaattisesta paineesta varsiosaan aiheutuvat voimasuureiden kuvaajat

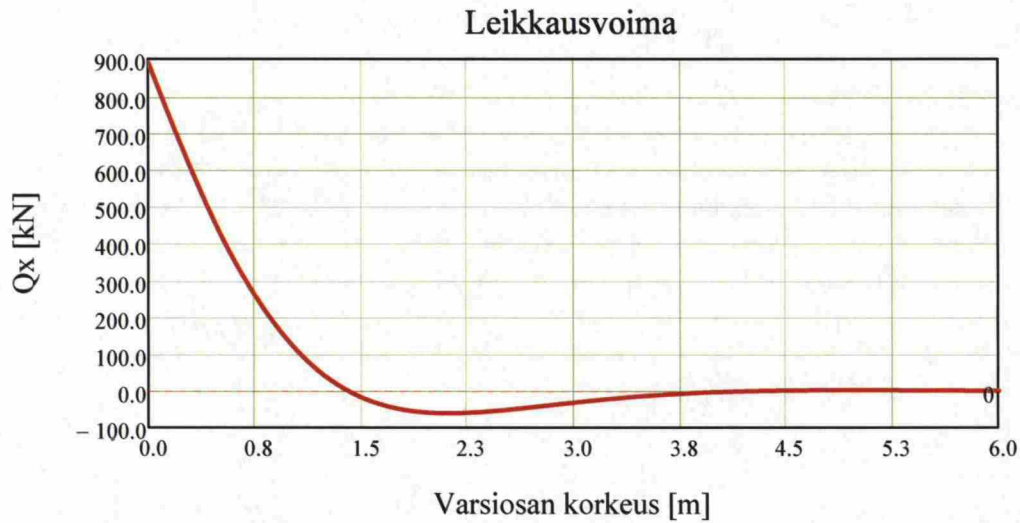
Kehänsuuntainen normaalivoima



Taivutusmomentti



SM.SM2 on taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri



Lämpökuorma: (Talvi)

Lämpötilat

Alkulämpötila

$$T_a := 20$$

Sisäpinnan lämpötila

$$T_s := 39.8$$

Ulkopinnan lämpötila

$$T_u := 33.9$$

Lämpötilan muutos

$$T_0 := \frac{T_s + T_u}{2} - T_a = 16.8$$

Lämpötilaero (lämpögradientti)

$$\Delta T := T_s - T_u = 5.9$$

$$\Delta T_{\text{grad}} := -\frac{\Delta T}{t_{\text{part.2_c}}} = -14.75 \frac{1}{\text{m}}$$

Homogeeninen ratkaisu

$$w_{0,T}(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (C_1 \cdot \cos(\beta \cdot s) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot s))$$

Yksityisratkaisu

$$w_{1,T}(s) := -\frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Reunaehdot :

$$w_T(0) = 0 \quad \frac{d}{ds} w_T(0) = 0$$

Kokonaisratkaisu:

$$w_T(s) = e^{-\beta \cdot s} \cdot (A_{1,T} \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_{2,T} \cdot \sin(\beta \cdot s)) + \frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Säteensuuntainen siirtymä on estetty: $w_T(0) = 0$

$$A_{1,T} + \frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4} = 0$$

$$A_{1,T} := -\frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4} = -0.577 \cdot \text{mm}$$

Kiertymä on estetty: $\frac{d}{ds} w_T(0) = 0$

$$\frac{d}{ds} w_T(s) = -\beta \cdot e^{-\beta \cdot s} \cdot [A_{1,T} \cdot (\cos(\beta \cdot s) + \sin(\beta \cdot s)) + A_{2,T} \cdot (\sin(\beta \cdot s) - \cos(\beta \cdot s))] = 0$$

$$-A_{1,T} - A_{2,T} = 0$$

$$A_{2,T} := A_{1,T} = -0.577 \cdot \text{mm}$$

Varsiosan säteensuuntainen siirtymä varsiosan korkeuden funktiona:

$$w_T(s) := e^{-\beta \cdot s} \cdot (A_{1,T} \cdot \cos(\beta \cdot s) + A_{2,T} \cdot \sin(\beta \cdot s)) + \frac{t_{\text{part.2_c}} \cdot E_{\text{cm}} \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot T_0}{r_{\text{part.2_c_m}} \cdot D \cdot 4 \cdot \beta^4}$$

Voimasuureet lämpökuormasta varsiosan korkeuden funktiona:

$$N_{\theta,T}(s) := E_{\text{cm}} \cdot t_{\text{part.2_c}} \cdot \left(\frac{w_T(s)}{r_{\text{part.2_c_m}}} - \alpha_{\text{con}} \cdot T_0 \right)$$

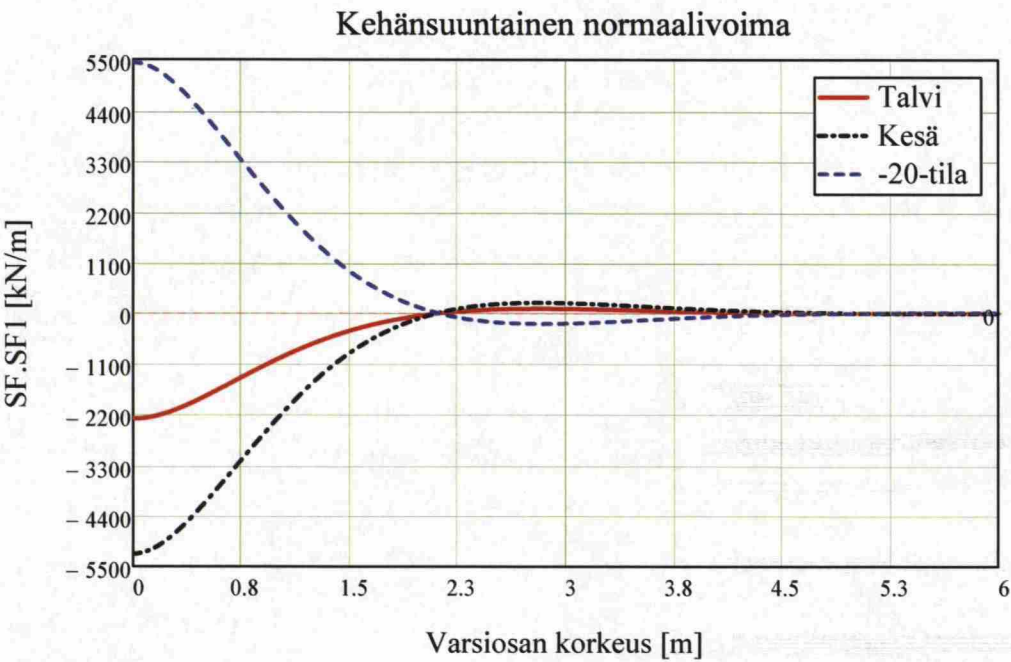
$$M_{x,T}(s) := -D \cdot \left[\frac{d^2}{ds^2} w_T(s) - \frac{(1 + \nu) \cdot \alpha_{\text{con}} \cdot \Delta T}{t_{\text{part.2_c}}} \right]$$

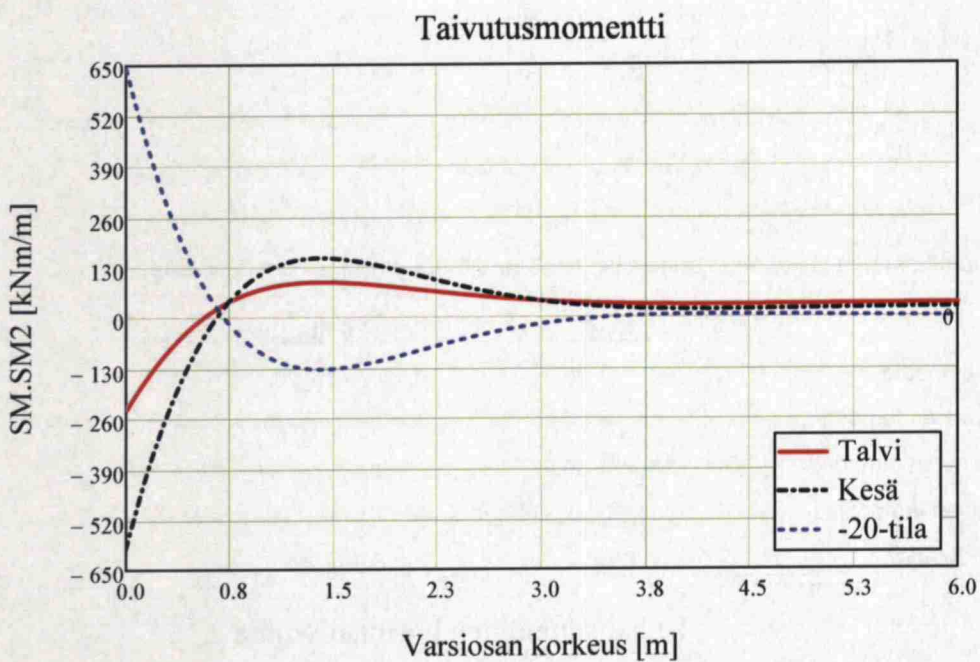
$$M_{\theta,T}(s) := -D \cdot \left[\nu \cdot \frac{d^2}{ds^2} w_T(s) - \frac{(1 + \nu) \cdot \alpha_{con} \cdot \Delta T}{t_{part.2_c}} \right]$$

$$Q_{x,T}(s) := \frac{d}{ds} M_{x,T}(s)$$

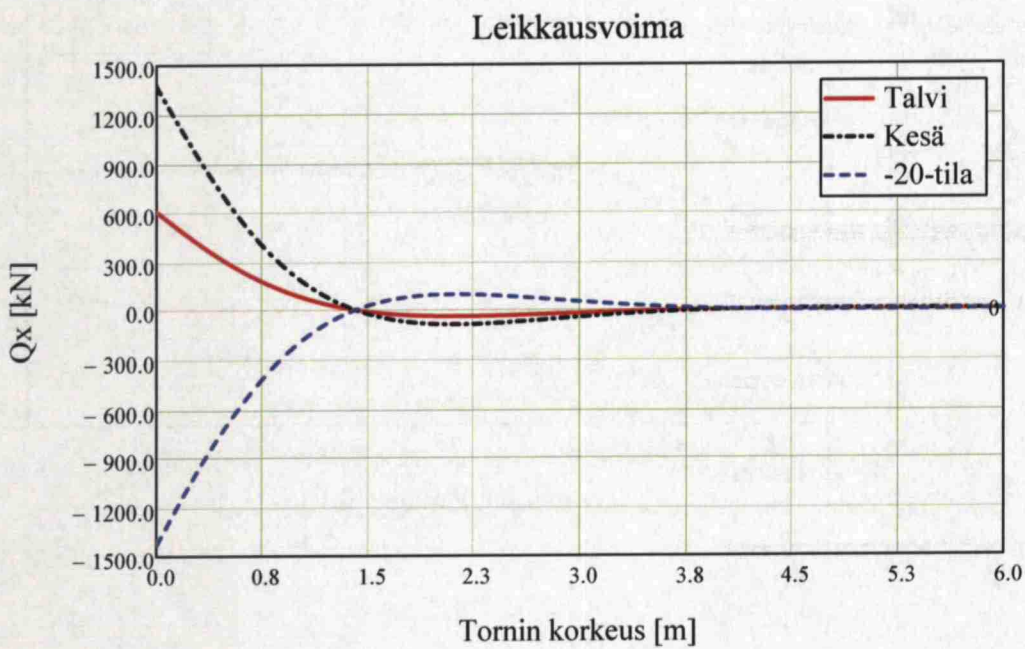
Suoritettiin samat laskelmat tapauksille: **kesä ja -20-tila** omilla lämpötila-arvoillaan.

	<u>Kesä</u>	<u>-20-tila</u>
Alkulämpötila	$T_{a,s} = 20$	$T_{a,20} = 20$
Sisäpinnan lämpötila	$T_{s,s} = 60.5$	$T_{s,20} = -20$
Ulkopinnan lämpötila	$T_{u,s} = 56.5$	$T_{u,20} = -20$
Tasainen lämpötila	$T_{0,s} = 38.5$	$T_{0,20} = -40$
Lämpötilaero	$\Delta T_s = 4$	$\Delta T_{20} = 0$





SM.SM2 on taivutusmomentti säteen suuntaisen paikallisen akselin ympäri



VARREN RAUDOITUSTEN MITOITUS

Epäkeskeinen veto

Epäkeskisen vedon ollessa kyseessä ei mitoituksessa oteta huomioon perusepäkeskisyyttä kuten puristetuissa rakenteissa. On olemassa kaksi epäkeskisyyystyyppiä, jotka vaikuttavat olennaisesti rakenteen raudoitusten mitoitukseen:

- **Suuri epäkeskisyyys:** Vallitsevana voimasuurena toimii taivutusmomentti, jonka seurauksena rakenteen poikkileikkaukseen aiheutuu puristusjäännityksiä
- **Pieni epäkeskisyyys:** Vallitsevana voimasuurena toimii normaalivoima, jonka seurauksena poikkileikkaus on kauttaaltaan vedetty.

Materiaalien tiedot

Betoni (25/30)

Puristuslujuus

$$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$$

Vetolujuus

$$f_{ctm} := 2.6 \text{ MPa}$$

Osavarmuuskerroin

$$\gamma_c := 1.35$$

Teräs (500)

Vetolujuus

$$f_s := 500 \text{ MPa}$$

Osavarmuuskerroin

$$\gamma_s := 1.15$$

TORNIN JUURI / kehänsuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määräävä kuormitusyhdistelmä KY-5)

Vetovoima (murtorajatila)

$$N_{d,1} := 6151 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Taivutusmomentti (murtorajatila)

$$M_{d,1} := 749 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Poikkileikkaus ja raudoitusten paikat

Rakenteen paksuus

$$d_{c,1} := 400 \text{ mm}$$

Betonipeite

$$e_{p,1} := 40 \text{ mm}$$

Raudoituksen etäisyys painopisteakseliin

$$a_{s,1} := \frac{d_{c,1}}{2} - e_{p,1} = 160 \text{ mm}$$

Raudoitusten välinen etäisyys

$$z_{s,1} := d_{c,1} - 2 \cdot e_{p,1}$$

Normaalivoiman epäkeskisyyys

$$e_{d,1} := \frac{M_{d,1}}{N_{d,1}} = 0.122 \text{ m}$$

Ulkopinnan raudoitusten etäisyys
normaalivoimaresultantista

$$e_{su,1} := a_{s,1} - e_{d,1} = 0.038 \text{ m}$$

Sisäpinnan raudoitusten etäisyys
normaalivoimaresultantista

$$e_{ss,1} := a_{s,1} + e_{d,1} = 0.282 \text{ m}$$

MITOITUS

Epäkeskiisyyden tarkastelu

$$\text{Epäkeskiisyys} := \begin{cases} \text{"suuri epäkeskiisyys"} & \text{if } e_{d,1} > a_{s,1} \\ \text{"pieni epäkeskiisyys"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"pieni epäkeskiisyys"}$$

Tasapainoehdot

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{su} = N_{ss} \cdot z_s$$

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{ss} = N_{su} \cdot z_s$$

Tarvittavat teräsmäärät

Ulkopinta

$$A_{su,1} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d,1}}{f_s} \cdot \frac{e_{ss,1}}{z_{s,1}} = 12457 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sisäpinta

$$A_{ss} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d,1}}{f_s} \cdot \frac{e_{su,1}}{z_{s,1}} = 1690 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

TORNIN JUURI / pystysuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määrittävä kuormitusyhdistelmä KY-2)

Vetovoima (murtorajatila)

$$N_{d_pyst_juuri} := 906 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Taivutusmomentti (murtorajatila)

$$M_{d_pyst_juuri} := 117 \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Poikkileikkaus ja raudoitusten paikat

Rakenteen paksuus

$$d_{c_pyst_juuri} := 400 \text{mm}$$

Betonipeite

$$e_{p_pyst_juuri} := 40 \text{mm}$$

Raudoituksen etäisyys
painopisteakseliin

$$a_{s_pyst_juuri} := \frac{d_{c_pyst_juuri}}{2} - e_{p_pyst_juuri} = 160 \cdot \text{mm}$$

Raudoitusten välinen etäisyys

$$z_{s_pyst_juuri} := d_{c_pyst_juuri} - 2 \cdot e_{p_pyst_juuri}$$

Normaalivoiman epäkeskiisyys

$$e_{d_pyst_juuri} := \frac{M_{d_pyst_juuri}}{N_{d_pyst_juuri}} = 0.129 \text{ m}$$

Ulkopinnan raudoitusten etäisyys
normaalivoimaresultantista

$$e_{su_pyst_juuri} := a_{s_pyst_juuri} - e_{d_pyst_juuri} = 0.031 \text{ m}$$

Sisäpinnan raudoitusten etäisyys
normaalivoimaresultantista

$$e_{ss_pyst_juuri} := a_{s_pyst_juuri} + e_{d_pyst_juuri} = 0.289 \text{ m}$$

MITOITUS

Epäkeskiisyyden tarkastelu

$$\text{Epäkeskiisyys} := \begin{cases} \text{"suuri epäkeskiisyys"} & \text{if } e_{d_pyst_juuri} > a_{s_pyst_juuri} \\ \text{"pieni epäkeskiisyys"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tasapainoehdot

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{su} = N_{ss} \cdot z_s$$

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{ss} = N_{su} \cdot z_s$$

Tarvittavat teräsmäärät

$$\text{Ulkopinta} \quad A_{su_pyst_juuri} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_pyst_juuri}}{f_s} \cdot \frac{e_{ss_pyst_juuri}}{z_{s_pyst_juuri}} = 1883 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Sisäpinta} \quad A_{ss_pyst_juuri} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_pyst_juuri}}{f_s} \cdot \frac{e_{su_pyst_juuri}}{z_{s_pyst_juuri}} = 201 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

4 METRIÄ / vaakasuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määäävä kuormitusyhdistelmä KY-5)

$$\text{Vetovoima (murtorajatila)} \quad N_{d_vaak_4m} := 3866 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Taivutusmomentti (murtorajatila)} \quad M_{d_vaak_4m} := 72 \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Poikkileikkaus ja raudoitusten paikat

$$\text{Rakenteen paksuus} \quad d_{c_vaak_4m} := 400 \text{mm}$$

$$\text{Betonipeite} \quad e_{p_vaak_4m} := 40 \text{mm}$$

$$\text{Raudoituksen etäisyys painopisteakseliin} \quad a_{s_vaak_4m} := \frac{d_{c_vaak_4m}}{2} - e_{p_vaak_4m} = 160 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Raudoitusten välinen etäisyys} \quad z_{s_vaak_4m} := d_{c_vaak_4m} - 2 \cdot e_{p_vaak_4m}$$

$$\text{Normaalivoiman epäkeskiisyys} \quad e_{d_vaak_4m} := \frac{M_{d_vaak_4m}}{N_{d_vaak_4m}} = 0.019 \text{ m}$$

$$\text{Ulkopinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista} \quad e_{su_vaak_4m} := a_{s_vaak_4m} - e_{d_vaak_4m} = 0.141 \text{ m}$$

Sisäpinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista $e_{ss_vaak_4m} := a_{s_vaak_4m} + e_{d_vaak_4m} = 0.179 \text{ m}$

MITOITUS

Epäkeskiisyyden tarkastelu

Epäkeskiisyys := $\begin{cases} \text{"suuri epäkeskiisyys"} & \text{if } e_{d_vaak_4m} > a_{s_vaak_4m} \\ \text{"pieni epäkeskiisyys"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Tasapainoehdot

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{su} = N_{ss} \cdot z_s$$

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{ss} = N_{su} \cdot z_s$$

Tarvittavat teräsmäärät

$$\begin{aligned} \text{Ulkopinta} \quad A_{su_vaak_4m} &:= \frac{\gamma_s \cdot N_{d_vaak_4m}}{f_s} \cdot \frac{e_{ss_vaak_4m}}{z_{s_vaak_4m}} = 4963 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \\ \text{Sisäpinta} \quad A_{ss_vaak_4m} &:= \frac{\gamma_s \cdot N_{d_vaak_4m}}{f_s} \cdot \frac{e_{su_vaak_4m}}{z_{s_vaak_4m}} = 3928 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \end{aligned}$$

4 METRIÄ / pystysuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määrittävä kuormitusyhdistelmä KY-3A)

Vetovoima (murtorajatila) $N_{d_pyst_4m} := 275 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Taivutusmomentti (murtorajatila) $M_{d_pyst_4m} := 2 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$

Poikkileikkaus ja raudoitusten paikat

Rakenteen paksuus $d_{c_pyst_4m} := 400 \text{ mm}$

Betonipeite $e_{p_pyst_4m} := 40 \text{ mm}$

Raudoituksen etäisyys painopiste akseliin $a_{s_pyst_4m} := \frac{d_{c_pyst_4m}}{2} - e_{p_pyst_4m} = 160 \cdot \text{mm}$

Raudoitusten välinen etäisyys $z_{s_pyst_4m} := d_{c_pyst_4m} - 2 \cdot e_{p_pyst_4m}$

Normaalivoiman epäkeskiisyys $e_{d_pyst_4m} := \frac{M_{d_pyst_4m}}{N_{d_pyst_4m}} = 7.273 \times 10^{-3} \text{ m}$

Ulkopinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista $e_{su_pyst_4m} := a_{s_pyst_4m} - e_{d_pyst_4m} = 0.153 \text{ m}$

Sisäpinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista $e_{ss_pyst_4m} := a_{s_pyst_4m} + e_{d_pyst_4m} = 0.167 \text{ m}$

MITOITUS

Epäkeskisyyden tarkastelu

Epäkeskisyys := $\begin{cases} \text{"suuri epäkeskisyys"} & \text{if } e_{d_pyst_4m} > a_{s_pyst_4m} \\ \text{"pieni epäkeskisyys"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"pieni epäkeskisyys"}$

Tasapainoehdot

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{su} = N_{ss} \cdot z_s$$

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{ss} = N_{su} \cdot z_s$$

Tarvittavat teräsmäärät

Ulkopinta $A_{su_pyst_4m} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_pyst_4m}}{f_s} \cdot \frac{e_{ss_pyst_4m}}{z_{s_pyst_4m}} = 331 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Sisäpinta $A_{ss_pyst_4m} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_pyst_4m}}{f_s} \cdot \frac{e_{su_pyst_4m}}{z_{s_pyst_4m}} = 302 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

VAPAASTI TUETTU / vaakasuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määrittävä kuormitusyhdistelmä KY-5)

Vetovoima (murtorajatila) $N_{d_vaak_vapaa} := 4659 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Taivutusmomentti (murtorajatila) $M_{d_vaak_vapaa} := 62 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$

Poikkileikkaus ja raudoitusten paikat

Rakenteen paksuus $d_{c_vaak_vapaa} := 400 \text{ mm}$

Betonipeite $e_{p_vaak_vapaa} := 40 \text{ mm}$

Raudoituksen etäisyys painopisteakseliin $a_{s_vaak_vapaa} := \frac{d_{c_vaak_vapaa}}{2} - e_{p_vaak_vapaa} = 160 \text{ mm}$

Raudoitusten välinen etäisyys $z_{s_vaak_vapaa} := d_{c_vaak_vapaa} - 2 \cdot e_{p_vaak_vapaa}$

Normaalivoiman epäkeskisyys $e_{d_vaak_vapaa} := \frac{M_{d_vaak_vapaa}}{N_{d_vaak_vapaa}} = 0.013 \text{ m}$

Ulkopinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista $e_{su_vaak_vapaa} := a_{s_vaak_vapaa} - e_{d_vaak_vapaa} = 0.147 \text{ m}$

Sisäpinnan raudoitusten etäisyys normaalivoimaresultantista $e_{ss_vaak_vapaa} := a_{s_vaak_vapaa} + e_{d_vaak_vapaa} = 0.173 \text{ m}$

MITOITUS

Epäkeskisyden tarkastelu

Epäkeskisyys := $\begin{cases} \text{"suuri epäkeskisyys"} & \text{if } e_{d_vaak_vapaa} > a_{s_vaak_vapaa} \\ \text{"pieni epäkeskisyys"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Tasapainoehdot

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{su} = N_{ss} \cdot z_s$$

Sisäpinnan raudoitusten suhteen

$$N_d \cdot e_{ss} = N_{su} \cdot z_s$$

Tarvittavat teräsmäärät

Ulkopinta $A_{su_vaak_vapaa} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_vaak_vapaa}}{f_s} \cdot \frac{e_{ss_vaak_vapaa}}{z_{s_vaak_vapaa}} = 5803 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Sisäpinta $A_{ss_vaak_vapaa} := \frac{\gamma_s \cdot N_{d_vaak_vapaa}}{f_s} \cdot \frac{e_{su_vaak_vapaa}}{z_{s_vaak_vapaa}} = 4912 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

VAPAASTI TUETTU / pystysuuntaan

ESITIEDOT

Voimasuureet (Määrävä kuormitusyhdistelmä KY-5)

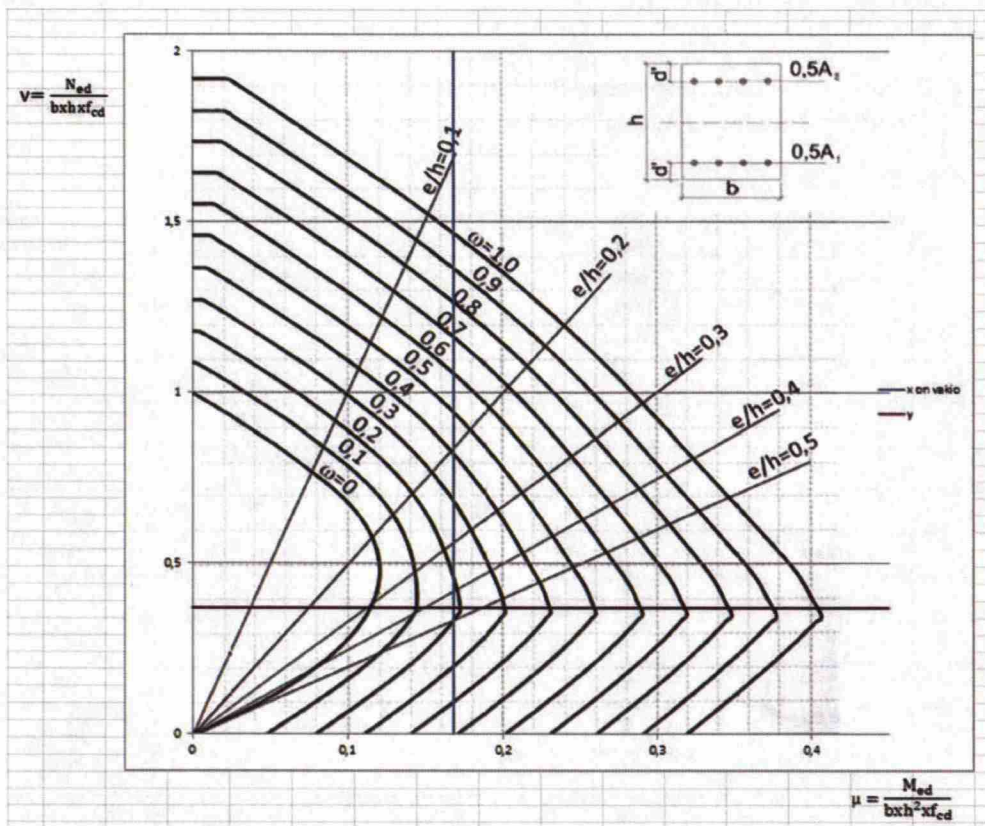
Vetovoima (murtorajatila) $N_{d_pyst_vapaa} := -1663 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Taivutusmomentti (murtorajatila) $M_{d_pyst_vapaa} := 62 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$

Rakenteen leveys $b := 1 \text{ m}$

$$\nu := \frac{N_{d_pyst_vapaa} \cdot \gamma_c}{d_{c,l} \cdot b \cdot f_{ck}} = 0.225 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\mu := \frac{M_{d_pyst_vapaa} \cdot \gamma_c}{b \cdot d_{c,l}^2 \cdot f_{ck}} = 0.021 \frac{1}{\text{m}}$$



Taulukosta nähdään, että minirauditus riittää.

Tarvittavat teräsmäärät

Ulkopinta $A_{su_pyst_vapaa} := 0.002 \cdot b \cdot d_{c.1} = 800 \cdot \text{mm}^2$

Sisäpinta $A_{ss_pyst_vapaa} := 0.002 \cdot b \cdot d_{c.1} = 800 \cdot \text{mm}^2$

VSL-ANKKURIJÄNNEMENETELMÄ

Liite 7

Rak 43-3136 Betonirakenteiden harjoitustyö II syksy 2012

Jännitetty rakenne ja liittorakenne

VSL-ANKKURIJÄNNEMENETELMÄ

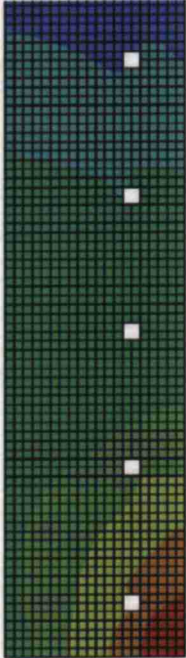
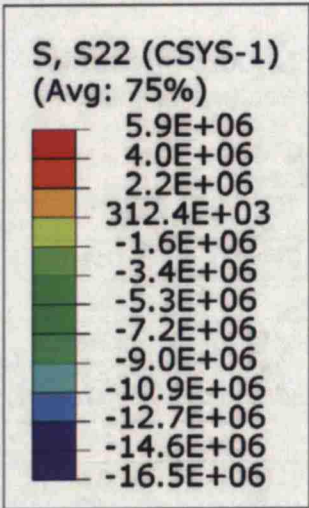
Punoksia kpl	Suojaputken sisähalkaisija mm	Jänteen epäkesk. kaarevilla osilla mm	Ankkurien mitat betoni $f_{cmi} \geq 33 \text{ MPa}$	Ankkurin reunaetäisyys	Ankkurien k/k-väli mm
1	20	4	70*70	60	70
2	30	4	120*120	85	120
3	35	7	120*120	85	125
4	40	7	140*140	95	145
5	40	7	180*180	115	180
6	45	7	180*180	115	180
7	50	8	180*180	115	205
8	50	8	250*250	150	250
9	55	9	250*250	150	250
10	60	10	250*150	150	250
11	60	10	250*250	150	250
12	65	11	250*250	150	265
13	65	11	300*300	175	300
14	70	11	300*300	175	300
15	70	11	300*300	175	300
16	70	11	300*300	175	305
17	75	12	300*300	175	320
18	75	12	300*300	175	335
19	80	13	300*300	175	345
20	80	13	330*330	190	345
21	85	13	330*330	190	360
22	85	13	330*330	190	370
23	90	13	400*400	225	400
24	90	13	400*400	225	400
25	95	13	400*400	225	400
26	95	13	400*400	225	400
27	100	14	400*400	225	400
28	100	14	400*400	225	410
29	100	14	400*400	225	420
30	100	14	400*400	225	430
31	100	14	400*400	225	440

Taulukko 1.12 Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt standardin EN 10025 mukaisten lujuusluokkien S235-S460 terästen myötölujuuden ja vetomurtolujuuden nimellisarvot [18,19,20]

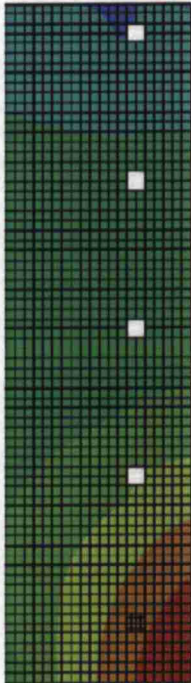
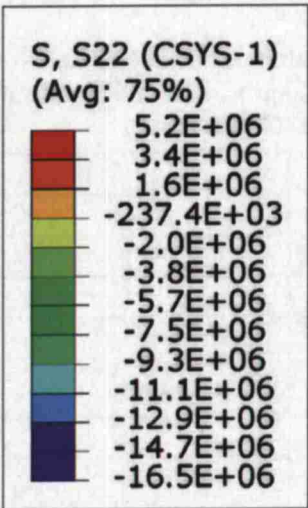
Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	<i>f_y</i> (N/mm ²)	<i>f_u</i> (N/mm ²)	<i>f_y</i> (N/mm ²)	<i>f_u</i> (N/mm ²)
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	490	335	470
EN 10025-3				
S275 N/NL	275	390	255	370
S355 N/NL	355	490	335	470
S420 N/NL	420	520	390	520
S460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S275 M/ML	275	370	255	360
S355 M/ML	355	470	335	450
S420 M/ML	420	520	390	500
S460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S235 W	235	360	215	340
S355 W	355	490	335	490
EN 10025-6				
S460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
Tämän taulukon arvot ovat Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt yksinkertaistetut arvot, joita on käytetty tämän käsikirjan laskuesimerkeissä. Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).				

Alimman jännekaapelin sijainnin vaikutus

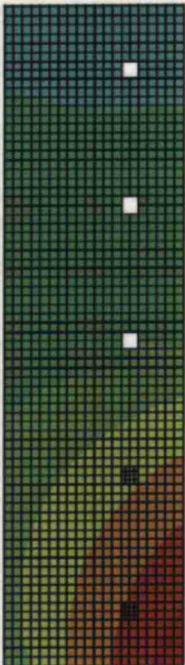
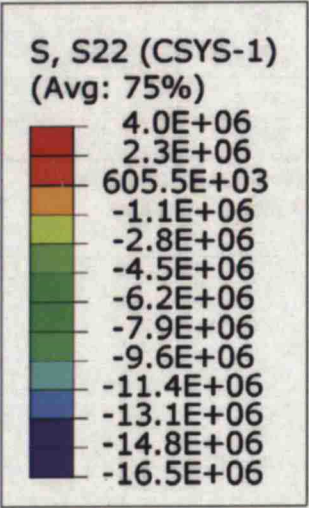
Liite 9



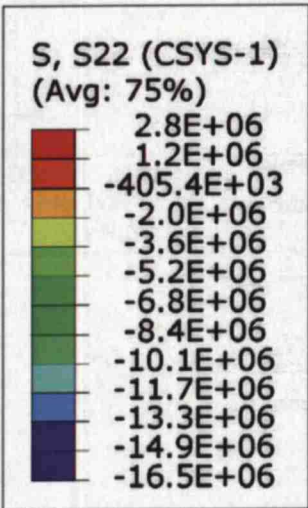
100



400



700



1000